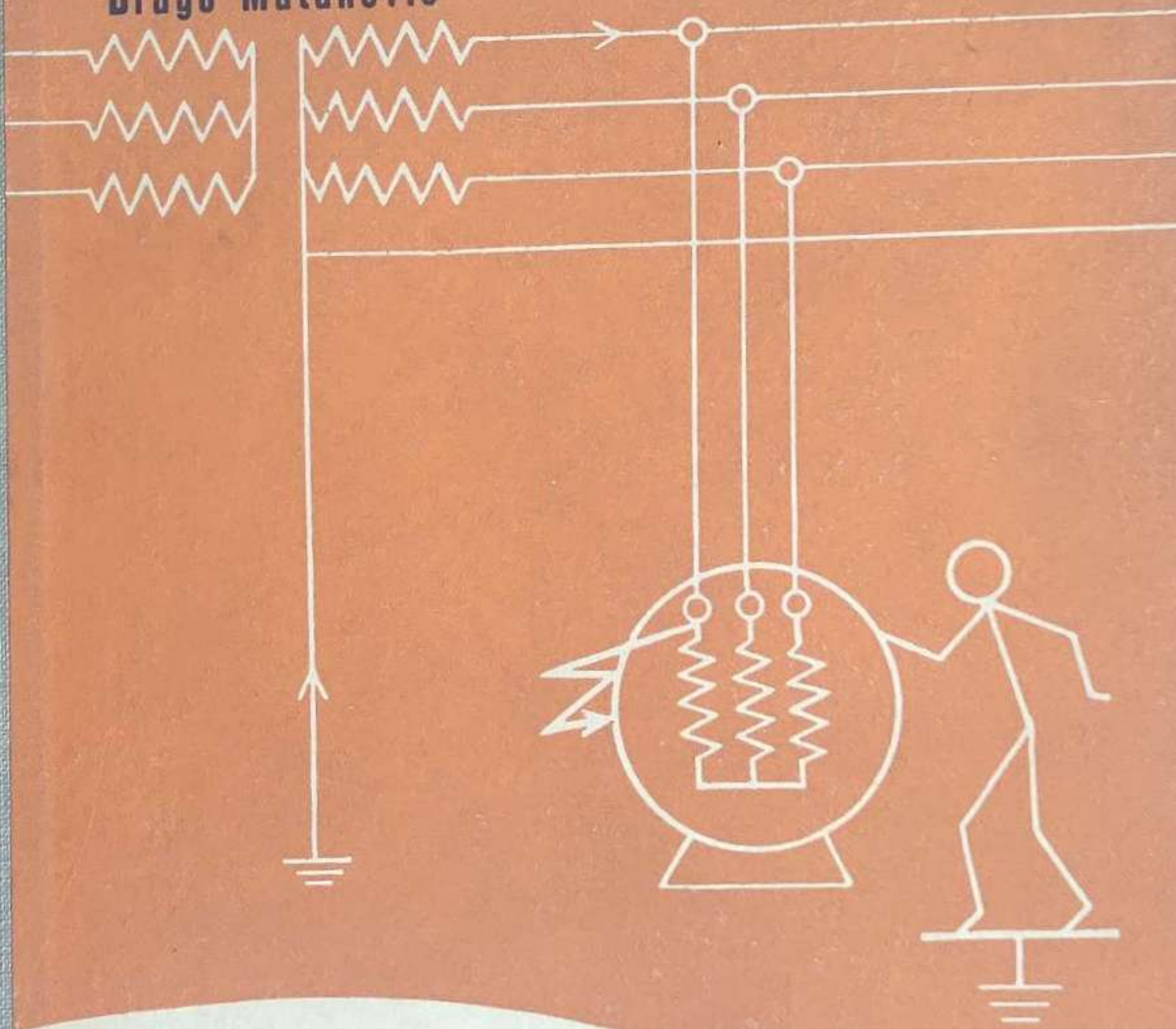
Drago Matanović



zaštitne mjere u električnim uređajima

TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB 1960

Dr. Ing. DRAGO MATANOVIĆ

ZAŠTITNE MJERE U ELEKTRIČNIM UREĐAJIMA

ZAGREB

NASLOV ORIGINALA:

Dr. Ing. DRAGO MATANOVIĆ

ZAŠČITNE MERE V ELEKTRIČNIH NAPRAVAH

PREVEO:

Ing. RATIMIR ŽURIĆ

Dr. Ing. DRAGO MATANOVIĆ

ZAŠTITNE MJERE U ELEKTRIČNIM UREĐAJIMA

Ing. Branko Pečar

TEHNIČKA KNJIGA

ZAGREB 1959

TISKARA »VJESNIK« - POGON »TIPOGRAFIJA«, ZAGREB

PREDGOVOR

Ova je knjiga gotovo potpuno u skladu sa prvim slovenskim izdanjem, ali je prerađena i djelomično nadopunjena, na taj način što uzima u obzir i najnoviji razvoj. Dodano je poglavlje o strujnom zaštitnom spoju koji se sve više upotrebljava.

Nadam se da će knjiga dobro poslužiti svim stručnjacima i da će doprinijeti smanjenju broja nezgoda od električne struje.

Ovom prilikom najljepše zahvaljujem Ing. Ratimiru Žuriću, koji je knjigu preveo sa slovenskog jezika.

Ljubljana, listopada 1959.

Autor

PREDGOVOR SLOVENSKOM IZDANJU

Svake godine strada mnogo ljudskih života od električnih nesreća. Takve nesreće uzrokuju i veće ili manje ozljede, koje smanjuju radnu sposobnost. Liječenje takvih ozljeda dugotrajno je, a može biti i neizlječivo.

Zbog toga moramo poznavati opasnost, koja nam prijeti od električne struje i smanjiti je, koliko je najviše moguće. U praksi se dosada nije posvećivala dovoljna pažnja tome, da se razmjerno malim troškovima smanji opasnost od električne struje.

U ovoj knjizi pokušao sam dati teoretske osnove zaštitnih mjera kod električnih uređaja i praktične upute za njihovu izvedbu.

Autor

U Ljubljani, dne 4. novembra 1948.

1. NESREĆE OD ELEKTRIČNE STRUJE

Mnogi su vjerojatno već osjetili neugodno djelovanje električne struje na organizam, što može imati i teške posljedice. Sjetimo se samo pokusa u školi s aparatom za elektriziranje, kad nas je učitelj poredao u povezani krug i pustio kroz nas električnu struju iz malog aparata. U početku, kod malog napona, pa prema tome i male struje, osjećamo samo mali nadražaj u prstima, a kako napon i struja rastu, osjećamo slabe grčeve, koji se povećavaju povećavanjem napona. Zatim nastupaju bolovi, koji postaju sve jači, što više rastu napon i struja, tako da prste i ruke više ne možemo po volji gibati. Na kraju bolovi postaju tako jaki, da ih teško podnosimo, a elektrode, preko kojih je zatvoren strujni krug, ne možemo više ispustiti, nego ih grčevito stišćemo prstima. Elektriziranje je tada postalo sasvim neugodno i bolno.

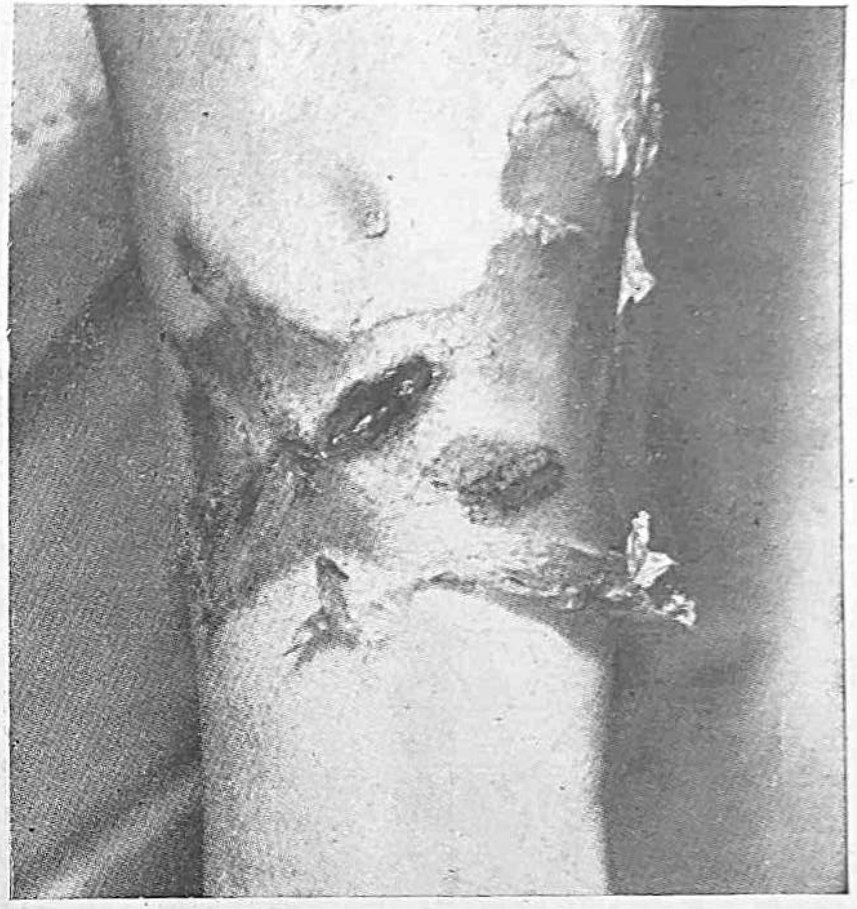
Mnogi su se i nehotice elektrizirali. Često se događa da je izolacija električnog trošila ili dijela električnog uređaja oštećena pa da dođemo u dodir s naponom. Tako se možemo elektrizirati ako, na primjer, dodirnemo stolnu električnu svjetiljku, koja ima metalni dio pod naponom, jer je izolacija dovodne žice oštećena i dodiruje se s metalnim dijelom svjetiljke. Može biti razbijen i poklopac prekidača, pa se kod uključivanja dodirnemo unutarnjih metalnih dijelova prekidača pod naponom. U tim slučajevima poteče struja pod djelovanjem napona kroz naše tijelo u zemlju, s kojom smo spojeni preko većeg ili manjeg prijelaznog otpora. Kod običnog izmjeničnog napona od 220 V prema zemlji dobijemo dosta jak udarac od struje. Ako smo se slučajno dodirnuli predmeta, koji je pod naponom, ruku ćemo odmah nesvijesno trgnuti natrag. U slučaju da smo taj predmet jako stegli, uvjereni da nije opasan, ne možemo ga više ispustiti, jer naši mišići ne mogu tako brzo reagirati. Ako struja potraje neko vrijeme, vrlo često nastupi grč, koji onemogućuje da ispustimo predmet pod naponom. Takav slučaj obično nema težih posljedica, ali ponekad ipak može prouzrokovati i smrt.

Najviše nesreća od električne struje događa se baš električarima, naročito monterima, koji su zaposleni na dalekovodima i razvodnim uređajima visokog napona. U mnogo slučajeva nesreću prouzrokuju nepažljivost i neopreznost. Monteri, navikli da rade u blizini visokog napona, postanu vremenom manje oprezni i po-

Slika 1.

činju zanemarivati sigurnosne propise i ne pridržavaju se primljenih naređenja. Oni, naime, ponekad rade i na uređajima pod visokim naponom, iako im je to zabranjeno. To se vrlo često osvećuje. Mnogo takvih nesreća događa se u vlažnim prostorijama, na primjer u vlažnim industrijskim pogonima, rudnicima i u kupaonicama, u slučaju da su instalacije u njima nepravilno izvedene ili

oštećene. Opasnost je kod visokog napona, razumije se, veća. 20 do 35% svih nesreća završava smrću unesrećenoga, dok broj smrtnih slučajeva kod niskog napona do 250 V prema zemlji iznosi otprilike 5% svih unesrećenja.



Slika 2.

Treba međutim naglasiti, da napon sam po sebi nije opasan. Opasna je struja, koja teče pod djelovanjem napona kroz naše tijelo. Pokusima je utvrđeno, da struja do jačine 20 mA obično nije opasna. Kod 30 mA osjećamo jake bolove, 50 mA je donja granica smrtne opasnosti, a 100 mA prouzrokuju u većini slučajeva smrt, ako struja teče kroz srce. Zanimljivo je, da struje jače od 150 mA prouzrokuju samo trenutačnu obamrlost srca, koje opet

proradi, ako struja nije tekla predugo. U slučaju da struja teče vrlo kratko vrijeme, manje od 1/10 sekunde, obično nema težih posljedica. Struje od nekoliko ampera, do približno 5 ampera, najčešće nisu smrtonosne, ali prouzrokuju teške opekotine. Kad struja

Slika 3.

prolazi kroz čovječje tijelo stvara se joulova toplina, koja prema iskustvu mora postići određenu veličinu, da postane smrtonosna. Vrlo rijetki su smrtni slučajevi ako je rad bio manji od 1200 Ws i ako je struja tekla kroz tijelo manje od 30 sekundi.

Električna struja, dakle, djeluje na srce, koje pod utjecajem struje počinje brže raditi. U tom slučaju nastane takozvano grčenje srčanih predkomora. Tada se broj otkucaja srca poveća kojiput do te mjere, da srce ne može izdržati toliki napor. Ponekad se događa da unesrećeni čovjek nakon nesreće hoda i radi, a istom poslije nekoliko sati pada mrtav. Srce je prestalo raditi. Nadalje, električna struja prouzrokuje i opekline bilo od strujnog luka, bilo od proizvedene joulove topline. Od strujnoga luka nastaju opekline i onda, kad struja ne teče kroz tijelo, a samo luk zahvati tijelo, koje se nalazi u blizini. Toplina, koju stvara struja kad prolazi kroz čovječje tijelo, prouzrokuje opekline samo onda, kad duže vremena teče jaka struja. Ako kroz tijelo unesrećenoga teče vrlo velika struja duže vremena, tijelo pougljeni, pri čemu izgubi mnogo na težini. Takve nesreće ponekad se događaju u dodiru s vodovima i rasklopnim uređajima visokog napona, u kojim slučajevima kroz tijelo unesrećenoga teče struja između faza ili pak struja zemnog spoja. Ozljede, koje nastaju uslijed stvorene topline ili od strujnog luka, obično su trajne prirode, odnosno neizlječive. Sl. 1 do 3 prikazuju takve ozljede. Zbog toga treba biti na oprezu kad se rukuje električnim uređajima. Uređaji moraju biti pravilno izvedeni i trajno održavani u ispravnom stanju. Strogo se treba pridržavati svih propisa i načela, koja važe za pravilan i bezopasan pogon, održavanje i upotrebu.

Električna struja utječe nadalje i na živčani sistem. Ti utjecaji i posljedice nisu još potpuno objašnjeni. Događa se, naime, da se poslije nesreća od električne struje kod unesrećenih pojavljuju razne smetnje kao, na primjer, uzetost pojedinih udova, smetnje u govoru, smetnje sluha i ravnoteže, smanjenje sposobnosti refleksa i t. d. Te smetnje se ponekad tijekom vremena smanjuju ili potpuno nestanu. Napominjemo, da postoje vrlo velike individualne razlike u osjetljivosti na električnu struju. Tvrdi se, da jedna te ista osoba može biti različito osjetljiva na električnu struju, već prema trenutačnom raspoloženju, odnosno prema podsvijesnoj pripremljenosti na opasnost od udarca struje. Tako je, na primjer poznato, da neki monteri provjeravaju bez posljedica da li je vod pod naponom kratkotrajnim dodirom čak i visokonaponskog voda, iako takav način nije ni u kom slučaju preporučljiv i monter se mora u tom slučaju vrlo dobro izolirati prema zemlji.

I frekvencija izmjenične struje ima veliki utjecaj. Smatra se, da je istosmjerna struja manje opasna od izmjenične struje istog efektivnog napona, frekvencije 50 Hz. Izmjenična struja takve fre-

kvencije je najopasnija, a opasnost se smanjuje rastućom frekvencijom. Struje visokih frekvencija nisu opasne i upotrebljavaju se, pravilno dozirane, za liječenje (dijatermija). U slučaju da je jačina struje velika, može ona, razumije se, također biti opasna, u stanju da prouzrokuje opekline.

Što se mora poduzeti u slučaju nesreće od električne struje? Ako je unesrećeni još pri svijesti, treba da sam pokuša prekinuti strujni krug i odvojiti se od dijelova pod naponom. Prva dužnost ostalih, koji su prisutni, ista je; moraju što prije prekinuti vezu između unesrećenog i dijelova pod naponom, najjednostavnije na taj način, što će iskopčati odgovarajuću sklopku ili izvaditi osigurač. Kod toga treba biti u najvećoj mjeri na oprezu i paziti, da se ne dođe u dodir s naponom neposredno ili posredno, preko unesrećenoga ili preko nekih drugih vodljivih predmeta. Zato je potrebno što bolje se izolirati prema zemlji. U tu svrhu upotrebljavaju se gumene rukavice, gumene cipele, suhe daske, suha odjeća i tako dalje, što se već nađe pri ruci. Ako unesrećenoga ne možemo odvojiti od napona iskapčanjem prekidača, moramo pokušati presjeći dovodni vodič. Ako to nije moguće, moramo mu i onda, kad je unesrećeni bez svijesti, silom razdvojiti prste, kojima grčevito drži žicu ili predmet, preko koga je u vezi s naponom. Moramo odmah pozvati liječnika, a u međuvremenu unesrećenome otkopčati ili svući odjeću, koja ga smeta ili steže. Opekline treba namazati uljem ili borovom mašću i odmah primijeniti umjetno disanje, koje treba vršiti na smjenu, sve dok unesrećeni ne dođe k svijesti, a najmanje 4 sata.

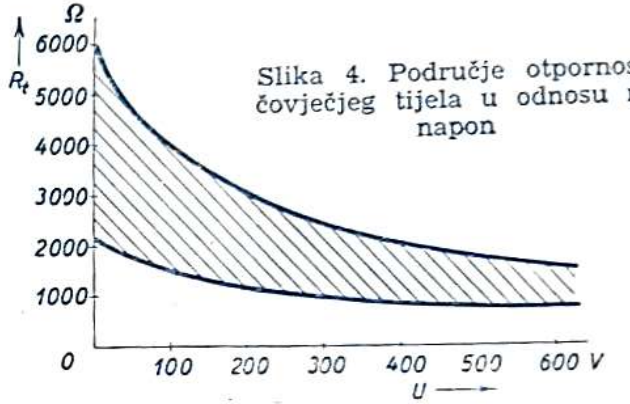
2. DODIRNI NAPON

Zbog svega što smo naveli zanima nas praktično pitanje: koliki je napon opasan? Na to pitanje nije moguće odmah odgovoriti. Vidjeli smo, naime, da je ustvari opasna struja određene jačine. Napon, zbog koga struja opasne jačine poteče kroz naše tijelo, ovisan je o električnom otporu tijela, odnosno dijela tijela kroz koji teče struja, a koji je sastavni dio nastalog električnog strujnog kruga. Zbog toga moramo najprije ustanoviti koliki je otpor čovječjeg tijela.

Dokazano je da električni, ohmski otpor čovječjeg tijela, nije konstantan. Već smo spomenuli da postoje velike individualne razlike, da čak kod jedne te iste osobe otpor prema električnoj

struji nije uvijek jednak. Nutarnji dijelovi tijela su po svom sastavu i kod obične frekvencije provodnik s dosta velikim ohmskim otporom, a koža je, ako je suha, dosta dobar izolator. Međutim, vlažna ili mokra koža dosta je dobar vodič električne struje i zbog toga su ljudi, koji imaju stalno vlažne ruke, manje otporni prema električnim udarcima i nesrećama. Kod viših napona tanka koža se odmah probije i na taj način se još više smanji ukupni otpor čovječjeg tijela.

Pokusi su pokazali da ohmski otpor čovječjeg tijela pada s rastućim naponom, koji tjera struju kroz tijelo. To djelovanje objašnjava se time, da struja većeg napona probije kožu na više



Slika 4. Područje otpornosti čovječjeg tijela u odnosu na napon

mjesta. Sl. 4. pokazuje kako se mijenja otpor R_t čovječjeg tijela u ovisnosti o naponu U, kojemu je tijelo izloženo. Moramo računati s otporom čovječjeg tijela između jedne ruke i druge ruke, odnosno noge, koji iznosi 1300 Ω, jer je to najmanji otpor kod napona 220 V, odnosno 1000 Ω kod napona 380 V. Između kraćih udaljenosti otpor je, razumije se, manji. Ako se srce ne nalazi na dijelu strujnog kruga kroz koji prolazi struja, tada je i opasnost od unesrećenja manja.

Ako smo, dakle, ustanovili da je struja od 50 mA najmanja jačina struje, koja je čovjeku opasna i ako računamo s otporom od 1300 Ω, onda je donja granica opasnog napona kod

$$0{,}05 \cdot 1300 = 65 \text{ V};$$

ako pak računamo s otporom 1000 Ω, najmanji opasni napon je

$$0{,}05 \cdot 1000 = 50 \text{ V}.$$

Budući da je ustvari najmanji otpor čovječjeg tijela kod napona 50 V približno 1800 Ω, to nastaje struja svega 28 mA. Tako je time data sigurnost, da naponi ispod 50 V nisu smrtno opasni, što potvrđuje i statistika nesreća od električne struje.

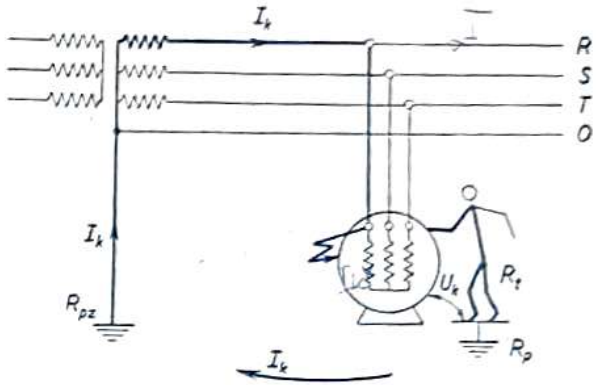
Propisi raznih država određuju granicu opasnog napona između 40 i 65 V. Prema gore izloženome, napon od 50 V može važiti kao granica opasnosti. I naši su standardi usvojili napon od 50 V. Time se ne tvrdi da se ni pod kakvim okolnostima i nikada ne može dogoditi nesreća i kod manjeg napona, već samo to, da su nesreće kod napona manjeg od 50 V sasvim izuzetni i vrlo rijetki slučajevi, kod kojih se nesreća dogodila i nastupila smrt samo zbog posve nepovoljnih okolnosti i izuzetno malog otpora tijela unesrećenoga prema električnoj struji. Prigodom tih smrtonosnih nesreća, kod napona ispod 50 V, električni udarac je ustvari samo povod smrti, a ne njezin uzrok. Djeca su u stanovitoj mjeri osjetljivija na električne udarce i zbog toga je za dječje igračke dozvoljen samo vrlo mali napon, najčešće 24 V. I kod životinja moramo računati s manjim otporom prema električnoj struji, za njih je donja granica opasnog napona približno 20 V.

Najveća struja, razumije se, teče kroz naše tijelo ako smo u neposrednom dodiru s dva vodiča, između kojih postoji napon kao, na primjer, kad uhvatimo dva fazna vodiča trofaznog sistema. To je najopasniji, ali rijedak slučaj koji se događa obično samo monterima, ako nisu oprezni. U toj situaciji ne pomažu nikakve zaštitne mjere, nego jedino oprez, disciplinirano i pridržavanje svih propisa i uputstava za rad na električnim uređajima.

a) Električne mreže s uzemljenim zvjezdištem

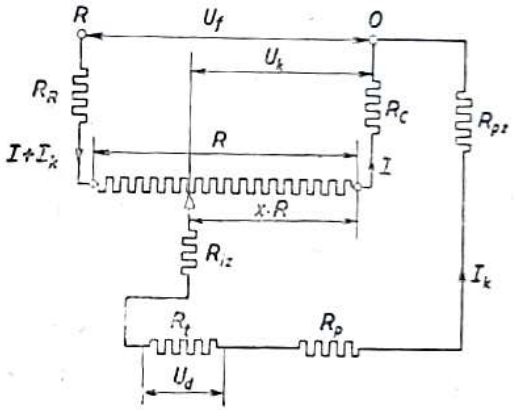
Već smo spomenuli da se najviše nesreća od električne struje događa zbog oštećene i neispravne izolacije, zbog čega kućišta ili drugi metalni dijelovi dolaze pod napon prema zemlji. Kad dodirnemo takve dijelove, nastane strujni krug koji se zatvara kroz naše tijelo i kroz zemlju do električne centrale ili transformatorske stanice. To se vidi na sl. 5. Transformator napaja iz svog sekundarnog namotaja trofazni vod, na kojega je priključeno trofazno trošilo, na primjer električni motor. Nulta točka transformatora u transformatorskoj stanici uzemljena je preko pogonskog uzemljenja s prelaznim otporom R_{pz}. Zbog griješke ili kvara na izolaciji namotaja faze R elektromotora, njegovo kućište došlo je u dodir

s naponom i dobilo prema zemlji napon kvara U_k, kojega veličina ovisi o mjestu kvara i može biti između vrijednosti 0 i punog faznog napona U_f ($0 = U_k = U_f$). Ako stojimo na zemlji i rukom dodirnemo kućište motora, nastane zatvoreni strujni krug, koji je na slici nacrtan debljom linijom. U tom strujnom krugu teče



Slika 5. Struja kvara u mreži s uzemljenim zvjezdištem kod kvara na izolaciji trošila

struja kvara I_k naime kroz faze R, zatim preko namotaja elektromotora na njegovo kućište, zatim kroz čovječje tijelo s otporom R_t, te preko prijelaznog otpora R_p od čovjeka prema zemlji, zatim



Slika 6. Nadomjesna shema spoja za određivanje dodirnog napona

kroz zemlju do pogonskog uzemljenja, i kroz njega natrag do faze R.

Na slici je smjer struje prikazan strelicom, ali se mora imati na umu da ustvari imamo izmjeničnu struju. Ukupni fazni napon raspodijeli se na cijeli strujni krug, te na čovjeka otpada samo dio

toga napona, koga moramo odrediti. Taj napon se naziva dodirnim naponom.

Da bismo odredili dodirni napon, upotrebljavamo nadomjesnu shemu spoja prema sl. 6. Ako zanemarimo otpor namotaja transformatora, koji je razmjerno vrlo mali, kod jednofaznog trošila su u seriju spojeni otpori R_R i R_o faznog, odnosno nultog vodiča, te otpor R jedne faze trošila. U nekoj točki ima faza trošila dodir s kućištem i u krugu od te točke do nulte točke mreže nalaze se u seriji otpor izolacije na mjestu kvara R_{iz}, otpor čovjeka R_t, prelazni otpor između čovjeka i zemlje R_p i otpor pogonskog uzemljenja R_{pz}. U tom strujnom krugu djeluje napon kvara U_k. U korisnom strujnom krugu neka teče, pod utjecajem faznog napona U_f, radna struja I, a u strujnom krugu kvara struja I_k. Mjesto kvara neka se nalazi na jednom dijelu faznog namotaja trošila, tako da otpor namotaja od mjesta kvara do nulte točke ima vrijednost $x \cdot R$, kod čega je $0 \leqq x \leqq 1$. Tada vrijedi jednadžba

$$U_k = I\,(x \cdot R + R_o) = I_k\,(R_{iz} + R_t + R_p + R_{pz}),$$

iz koje možemo izračunati struju kvara koja teče kroz čovječje tijelo

$$I_k = I\,\frac{x \cdot R + R_o}{R_{iz} + R_t + R_p + R_{pz}} =$$

$$= \frac{U_f\,(x \cdot R + R_o)}{(R + R_R + R_o)\,(R_{iz} + R_t + R_p + R_{pz})},$$

jer je pogonska struja dana izrazom

$$I = \frac{U_f}{R + R_R + R_o}.$$

Otpori vodiča R_R i R_o su razmjerno vrlo mali prema otporu čovječjeg tijela R_t i prelaznog otpora prema zemlji R_p. Isto tako i otpor pogonskog uzemljenja mora biti mali, da bi odgovorio svojoj namjeni. Zbog toga možemo u računu zanemariti ta tri otpora. Osim toga moramo računati s najnepovoljnijim slučajem kvara kad, naime, dođe do potpunog dodira između vodiča pod naponom i kućišta trošila, tako da je i otpor izolacije beznačajno malen. Zato uvrstimo

$$R_R \cong 0, \quad R_o \cong 0, \quad R_{pz} \cong 0, \quad R_{iz} \cong 0,$$

pa će gornji izraz za struju kvara dobiti slijedeći, dovoljno točan oblik:

$$I_k = \frac{U_f\,x}{R_t + R_p}.$$

Dodirni napon bit će, prema tome, jednak padu napona u čovječjem organizmu i iznosit će

$$U_d = I_k\,R_t = \frac{U_f\,x\,R_t}{R_t + R_p}$$

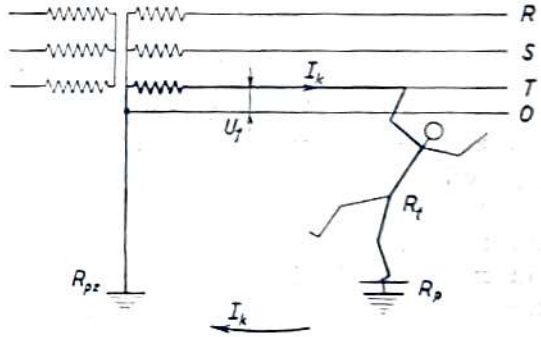
te ima neku vrijednost kod danog otpora čovječjeg organizma i prelaznog otpora, koja može biti, već prema mjestu kvara izolacije namotaja, između nule i neke najveće vrijednosti, koja odgovara najnepovoljnijem slučaju, za nas odlučujućem. S tim najvećim dodirnim naponom moramo računati kod naših daljnjih izlaganja kad je $x = 1$, odnosno dodirni napon

$$U_d = \frac{U_f\,R_t}{R_t + R_p} = \frac{U_f}{1 + R_p/R_t},$$

a struja kvara

$$I_k = \frac{U_f}{R_t + R_p}.$$

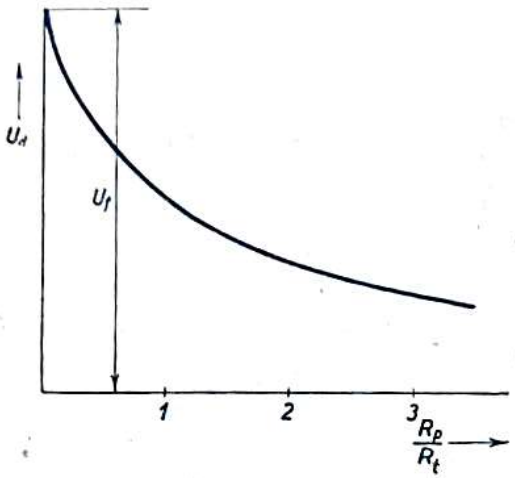
Taj najnepovoljniji slučaj nastupa ustvari kod direktnog dodira faznog vodiča, kako je prikazano na sl. 7.



Slika 7. Neposredni dodir faznog vodiča

Kao što vidimo, veličina dodirnog napona ovisi jedino o faznom naponu, to jest o naponu faznog vodiča prema zemlji, te o odnosu prelaznog otpora između čovječjeg tijela i zemlje, i otporu samog čovječjeg tijela.

Na sl. 8. lijepo se vidi da je dodirni napon to veći, što je manji prelazni otpor između čovječjeg tijela i zemlje. U najnepovoljnijem slučaju prelazni je otpor između čovječjeg tijela i zemlje vrlo ma-



Slika 8. Ovisnost dodirnog napona o prelaznom otporu između čovječjeg tijela i zemlje

len, odnosno jednak nuli, i u tom je slučaju dodirni napon jednak faznom naponu mreže, odnosno

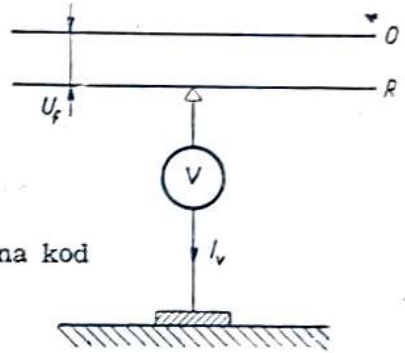
$$U_d = U_f \text{ kod } R_p = 0.$$

U najpovoljnijem slučaju, kad je prelazni otpor između čovječjeg tijela i zemlje beskonačno velik, što odgovara potpunoj izolaciji, dodirni napon je

$$U_d = 0 \text{ kod } R_p = \infty.$$

Iz toga proizlazi, da velik prelazni otpor između čovječjeg tijela i zemlje ima veliku važnost, jer umanjuje opasnost unesrećenja od električne struje, dok mali prelazni otpor u velikoj mjeri povećava takvu opasnost. Zbog toga je potrebno pobrinuti se da kod rada s električnim aparatima i uređajima prelazni otpor između našeg tijela i zemlje bude što je moguće veći. Ako je podloga, na kojoj čovjek stoji, od izolacionog materijala, dodirni napon se u svakom slučaju smanjuje, pa prema tome i opasnost od nesreće. Prelazni otpor, naime, ovisi o okolnostima, pod kojima se čovjek nalazi dok radi na električnim aparatima i uređajima. Ako, na primjer, imamo na nogama suhu obuću i stojimo na suhu tlu, koje je razmjerno slab vodič, tada je i prelazni otpor između našeg tijela i zemlje razmjerno velik, a opasnost od unesrećenja

utoliko je manja. Zbog toga su nesreće od električne struje u suhim prostorijama, na primjer u stanovima, vrlo rijetke. Ako naprotiv stojimo na vlažnu tlu, na primjer na betonu, s vlažnom obućom na nogama ili bosi, tada je i opasnost od električne nesreće vrlo velika zbog velikog dodirnog napona. Zbog toga trebamo biti oprezni kad u vlažnim prostorijama radimo električnim strojevima ili električnim uređajima i uopće u svakom slučaju, gdje je prelazni otpor između čovječjeg tijela i zemlje malen. U takvim uslovima moramo se pobrinuti za posebne sigurnosne mjere, da smanjimo opasnost i spriječimo nesreću.



Slika 9. Mjerenje napona kod dodira

Opasnost je naročito vrlo velika kad smo neposredno dobro uzemljeni, na primjer, kad jednom rukom držimo vodovodnu slavinu, koja je preko vodovodne mreže odlično uzemljena, a drugom rukom dođemo u dodir s vodovima pod naponom. U praksi je to moguće, na primjer, kad hoćemo napuniti električni lonac, koji je ukopčan, vodom iz slavine, ako je na izolaciji električnog grijača u loncu nastao kvar.

Dodirni napon može se lako izmjeriti voltmetrom, koji ima unutarnji otpor jednak otporu čovječjeg tijela u granicama opasnog napona, to jest 1000 Ω. Prema slici 9., voltmetar priključimo na napon između faze i elektrode, koja nadomještava prelazni otpor između čovječjeg tijela i tla. Ta elektroda treba da bude od metala, najbolje od olova, da dobro priliježe na tlo. Treba da ima površinu prilijeganja približno 6 dm², što odgovara, kod kružnog oblika, promjeru 26,6 cm. Voltmetar će neposredno pokazati dodirni napon. Kroz voltmetar teče struja

$$I_v = \frac{U_f}{R_v + R_p} = \frac{U_f}{R_t + R_p}$$

kod

$$R_v = R_t,$$

jer je unutarnji otpor R_v voltmetra jednak otporu čovječjeg tijela. U većini slučajeva ne ćemo imati na raspolaganju voltmetar s takvim željenim unutarnjim otporom, nego običan instrument s većim unutarnjim otporom. Budući da otpor voltmetarskog kruga treba da bude jednak otporu čovječjeg tijela, možemo pomoći sebi na taj način, što ćemo paralelno s voltmetrom priključiti otpor potrebne veličine. Kada pak imamo, u izuzetnom slučaju, voltmetar s premalenim unutarnjim otporom, možemo pomoći sebi na taj način, što ćemo priključiti u seriju s voltmetrom otpor potrebne veličine. Za mjerenje dodirnog napona možemo upotrebiti bilo koji voltmetar poznatog otpora R_v, pa da dodirni napon izračunamo iz otklona voltmetra. Kroz njega će, naime, teći struja

$$I_v' = \frac{U_f}{R_t + R_p}.$$

Iz te jednadžbe najprije izračunamo prelazni otpor između elektrode i zemlje, naime

$$R_p = \frac{U_f - I_v' \cdot R_v}{I_v'} = \left(\frac{U_v}{U_f} - 1\right) \cdot R_v,$$

jer je

$$U_v = I_v' \cdot R_v$$

otklon voltmetra. Dobiveni izraz za prelazni otpor uvrstimo u prijašnju jednadžbu, koja će onda dobiti vrijednost

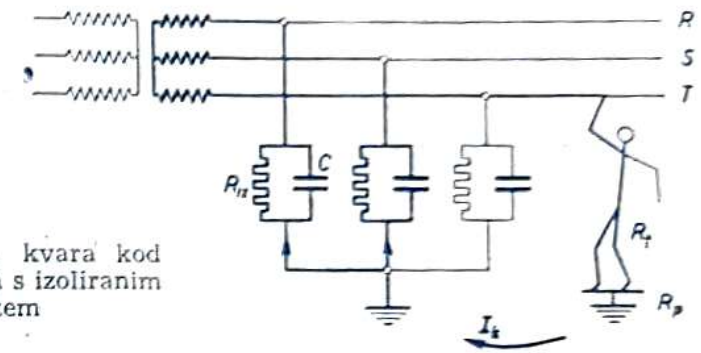
$$U_d = \frac{U_f}{1 + \frac{R_p}{R_t}} = \frac{U_f}{1 + \frac{R_v}{R_t} \cdot \left(\frac{U_f}{U_v} - 1\right)}.$$

Ta jednadžba potvrđuje, da će voltmetar neposredno pokazati dodirni napon u slučaju, da je njegov unutarnji otpor jednak otporu čovječjeg tijela.

b) Mreže s izoliranim zvjezdištem

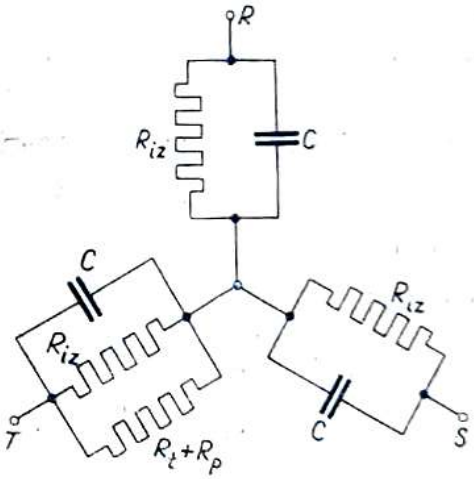
Dosada smo razmatrali samo trofazni sistem s uzemljenim zvjezdištem. Taj razvodni sistem upotrebljavamo općenito u našim trofaznim mrežama, na koje se priključuju elektromotori na tri

linijska (međufazna) napona U, ili žarulje i jednofazna trošila na tri fazna napona U_f. Kad nemamo rasvjetnog opterećenja, odnosno kad imamo za njega posebnu odvojenu mrežu, na primjer u tvornici ili u rudniku, tada se može upotrebiti za pogon električnih motora i trofazni razvodni sistem bez uzemljenog zvjezdišta. Razmotrimo stanja, koja nastupaju u takovoj mreži!



Slika 10. Struja kvara kod razvodnog sistema s izoliranim zvjezdištem

U tom slučaju struja kvara iste jačine ne može teći kroz čovječje tijelo, jer nema povezanog puta kroz pogonsko uzemljenje u transformatorskoj stanici ili u centrali. Ipak moramo računati s nekom malom strujom kvara zbog nepotpune izolacije, odnosno zbog kapaciteta vodiča prema zemlji. Prema sl. 10. ima svaka faza izolacioni otpor R_{iz} i kapacitet C prema zemlji.



Slika 11. Nadomjesna shema, spoja za slučaj struje kvara u mrežama sa izoliranim zvjezdištem

Nadomjesnu shemu spoja za taj slučaj prikazuje sl. 11. Struju I_t, koja protječe kroz čovjeka, možemo prema osnovama elektrotehnike izračunati, na primjer, pomoću metode simetričnih kompo-

nenata ili na drugi način (vidi na primjer, Matanović: »Rudarsko-metalurški zbornik«, Ljubljana 1952, strana 39 do 49). Ta struja data je izrazom

$$I_t = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{R_t} \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{R_{iz}^2} + \omega^2 C^2}{\left(\frac{1}{R_t} + \frac{3}{R_{iz}^2}\right)^2 + 9\,\omega^2 C^2}}\,.$$

a dodirni napon je u tom slučaju

$$U_d = \sqrt{3} \cdot U \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{R_{iz}^2} + \omega^2 C^2}{\left(\frac{1}{R_t} + \frac{3}{R_{iz}}\right)^2 + 9\,\omega^2 C^2}}\,.$$

Dobiveni izraz za struju, koja protječe kroz čovjeka, možemo protumačiti na taj način, što ćemo najprije zanemariti kapacitet mreže ($C = 0$, $X_C = 1/\omega\, C = \infty$). U tom slučaju će struja, koja protječe kroz čovjeka, biti

$$I_t = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{3\,R_t + R_{iz}}\,.$$

Ta struja ne smije biti veća od 0,05 A. Ako računamo s otporom čovjeka $R_t = 1000\ \Omega$, vrijedi jednadžba

$$0{,}05 \leq \frac{\sqrt{3} \cdot U}{3 \cdot 1000 + R_{iz}}\,,$$

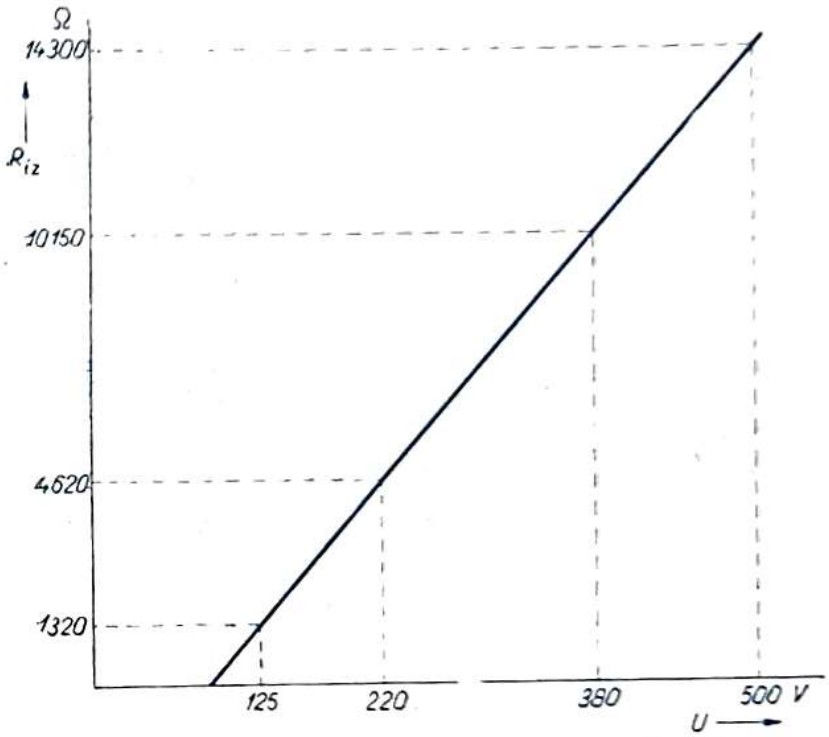
iz koje dobijemo najmanji otpor izolacije mreže R_{iz}

$$R_{iz} \geq 20\,\sqrt{3}\,U - 3000 = 34{,}6\,U - 3000,$$

koji mora imati svaka faza mreže prema zemlji, da ne bi mogla poteći opasna struja kvara. Što je veći napon, to mora biti veći otpor izolacije prema zemlji.

Dijagram na slici 12 prikazuje prema ovom obrascu izračunate potrebne izolacijske otpore R_{iz} kod raznih međufaznih napona U.

Tu moramo voditi račun o tome, da je to ukupni otpor izolacije svake faze čitave mreže. Poznato je, naime, da propisi zahtijevaju za svaki odvojak mreže, odnosno za svaki posebno osigurani dio mreže, za svaki volt napona po 1000 Ω otpora izolacije, na primjer, kod 220 V faznog napona za svaki dio mreže 220 000 Ω prema zemlji. U tom slučaju je u svakom dijelu mreže struja kvara

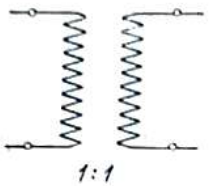


Slika 12. Potreban ukupni otpor izolacije mreže kod raznih međufaznih napona

1 mA. Ako imamo N takvih dijelova mreže, ukupni propisani otpor izolacije bit će N-puta manji, odnosno, ukupna struja kvara bit će N mA. Iz toga proizlazi, da kod propisanog otpora izolacije R_{iz} cjelokupne mreže kod napona U smijemo imati najviše

$$N \leq \frac{1000 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot R_{iz}}$$

dijelova mreže, na primjer, kod linijskog (međufaznog) napona $U = 380$ V najviše 21 dio. Već iz toga računa proizlazi, da ćemo u velikim mrežama s mnogo ogranaka teško postići traženi ukupni otpor izolacije. Manje razgranate mreže s manjim brojem ogranaka i potrošača su, prema tome, povoljnije. U posebnim slučajevima otpor izolacije možemo povećati na taj način, što ćemo mrežu razdijeliti na više dijelova, koji će se napajati preko izolirajućih transformatora s prenosom 1:1, prema slici 13.



Slika 13. Izolirajući transformator

Moramo još napomenuti, da propisi ne zahtijevaju navedene otpore izolacije po 1000 Ω za svaki volt napona u vlažnim prostorijama, jer bi to bilo teško postići. Moramo isto tako računati s time, da otpor izolacije vremenom opada zbog starenja izolacije, pa se dozvoljeni broj dijelova mreže i zbog toga mora smanjiti.

Kod linijskog napona

$$U = \frac{3000}{20 \cdot \sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot 50 = 86{,}5 \text{ V}$$

smiju faze imati čak i puni zemni spoj, a da ipak ne nastupi opasnost po život.

Ako u drugom slučaju pretpostavimo beskonačni otpor izolacije ($R_{iz} = \infty$), prijašnji opći izraz dobiva slijedeći oblik:

$$I_t = \frac{\sqrt{3}\,U}{R_t} \sqrt{\frac{\omega^2 C^2}{\frac{1}{R_t^2} + 9\,\omega^2 C^2}} = \sqrt{3}\,U \frac{\omega C}{\sqrt{1 + 9\omega^2 C^2 R_t^2}}.$$

Kod $I_t = 0{,}05$ A i $R_t = 1000\ \Omega$, dobit ćemo jednadžbu

$$0{,}05 \leq \frac{\sqrt{3}\,U\,\omega\,C}{\sqrt{1 + 9 \cdot 10^6\,\omega^2 C^2}},$$

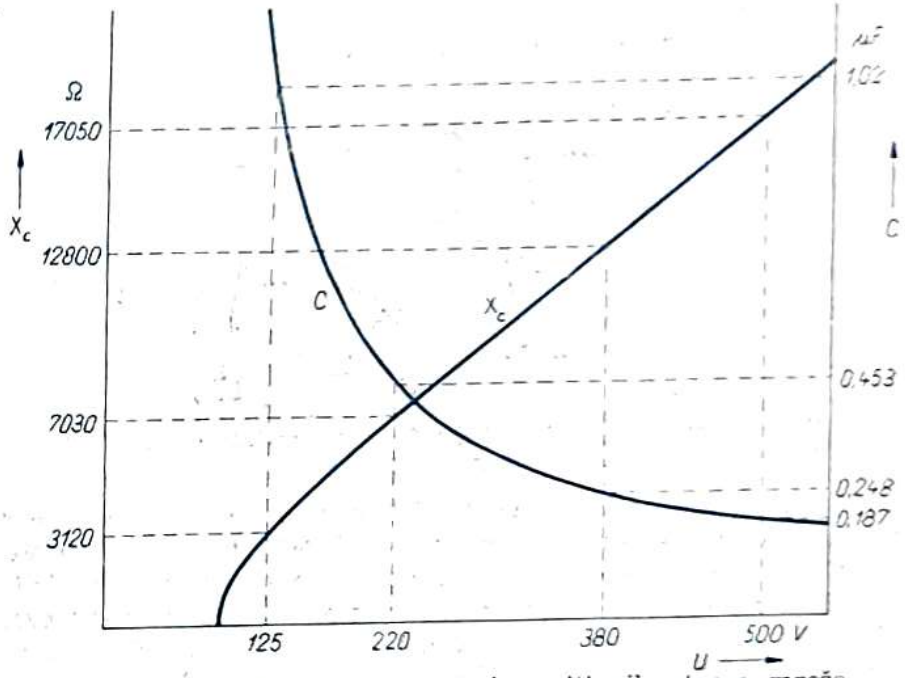
u kojem slučaju kapacitivni otpor svake faze prema zemlji mora biti bar

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \geq 20\sqrt{3}\sqrt{U^2 - 7500} = 34{,}6\sqrt{U^2 - 7500},$$

odnosno, kapacitet svake faze prema zemlji smije biti kod frekvencije 50 Hz najviše

$$C \leq \frac{1}{2\pi 50 \cdot 34{,}6\sqrt{U^2 - 7500}} = \frac{1}{3460\pi\sqrt{U^2 - 7500}}.$$

Dijagram na slici 14 prikazuje dozvoljene kapacitivne otpore mreže, izračunate prema gornjim obrascima, a kod raznih linijskih napona. Kapacitivni otpor ima vrijednost 0, ako je



Slika 14. Dijagram dozvoljenih kapacitivnih otpora mreže kod raznih linijskih napona U

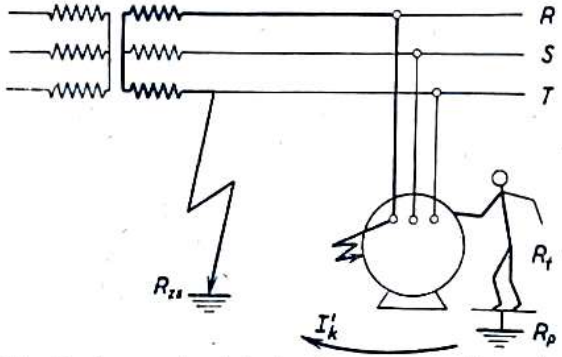
$$\sqrt{U^2 - 7500} = 0,$$

ili opet kod napona

$$U = 86{,}5 = \sqrt{3} \cdot 50 \text{ V}.$$

Iz toga vidimo, da kapacitet mreže mora biti to manji, što je veći napon mreže, ako želimo da mreža bude sigurna i ako je izolacija potpuna. U praksi kablovi imaju kapacitet približno 0,25 μF/km, gumirani vodiči pak 0,6 μF/km. Ako imamo gumirane vodiče, cjelokupna dužina mreže kod linijskog napona $U = 380$ V iznosit će najviše približno 400 m, uračunavši tu sve odcjepe i ogranke. Tu primjećujemo jedan nesklad, naime, da je kod višeg napona prirodni opseg napajanja mreže veći, ali da bi s obzirom na sigurnost morao biti manji.

Iz svega toga zapravo proizlazi, da dodir faze i kod mreže s izoliranim zvjezdištem također može biti smrtonosan, osim kod vrlo niskog linijskog napona ispod 125 V. Zato je također propisano da se ponegdje, na primjer u rudnicima, za ručni alat i eventualno za prenosive strojeve upotrebljava napon 125 V, u sistemu koji je izoliran od zemlje, a koji se dobije pomoću specijalnih transformatora razmjerno male snage, priključenih na razvodnu mrežu niskog napona, na primjer na 380 V ili na 500 V.



Slika 15. Struja kvara kod jednofaznog zemljospoja u mreži s izoliranim zvjedištem

Kad u mreži s izoliranim zvjedištem nastane zemljospoj jedne faze, tada je neposredni dodir svake od ostalih dviju faza vrlo opasan, a može biti i smrtonosan. Isto tako je opasno kad jedna faza dobije, prema sl. 15., spoj s kućištem elektromotora zbog kvara na izolaciji, a dodirnemo se kućišta. U tom slučaju poteći će struja kvara I_k', a njena veličina ovisit će samo o otporu čovječjeg tijela R_t, o prelaznom otporu R_p između čovjeka i zemlje i o prelaznom otporu zemljospoja R_{zs}, jer otpor vodova možemo zanemariti u računu. Jačina struje će, dakle, biti

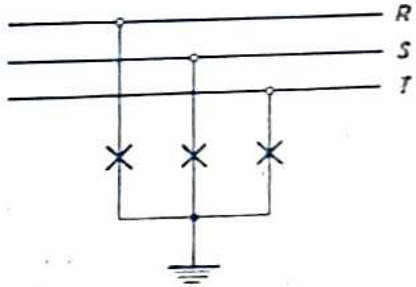
$$I_k' = \frac{U}{R_t + R_p + R_{zs}}.$$

Kad je prelazni otpor između čovjeka i zemlje malen, možemo ga zanemariti. Isto tako kod jakog zemljospoja možemo zanemariti i otpor R_{zs} zemljospoja, jer je prema otporu čovječjeg tijela malen. U tom će slučaju struja kvara biti

$$I_k' = \frac{U}{R_t} \text{ kod } R_p = 0,\ R_{zs} = 0,$$

te je $\sqrt{3}$-puta veća nego u pomenutom primjeru kod mreža s neposredno uzemljenim zvjezdištem.

Toliko veća struja kvara, pod uticajem većeg dodirnog napona, kod jednofaznog zemljospoja je, razumije se, opasna. Zbog toga mreža, u slučaju zemljospoja jedne faze, ne smije biti duže vremena u pogonu. Opasnost je utoliko veća, ukoliko je manji otpor zemljospoja, koji je u većini slučajeva veći od 5 Ω. Zbog toga moramo stalno kontrolirati stanje izolacije takvog razvodnog sistema. Zato upotrebljavamo optičke ili akustičke signalne uređaje, koji nas odmah upozore čim nastane zemljospoj. Takva kontrola izolacije ustvari je zaštitna mjera. Čim kontrolni uređaj pokaže zemljospoj, osoblje, koje ga poslužuje, mora ga odmah otkloniti. Moramo,

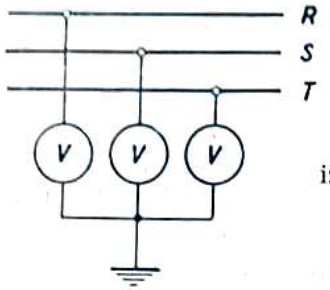


Slika 16. Kontrola izolacije mreže pomoću žarulje

naime, imati na umu da je opasnost od električne nesreće kod razvodnog sistema s izoliranim zvjezdištem znatno manja nego kod sistema s neposredno uzemljenim zvjezdištem samo dotle, dok je stanje izolacije mreže zadovoljavajuće, inače je opasnost mnogo veća. Nikada se ne smije dozvoliti da mreža s izoliranim zvjezdištem ostane duže vremena u pogonu sa zemljospojem jedne faze.

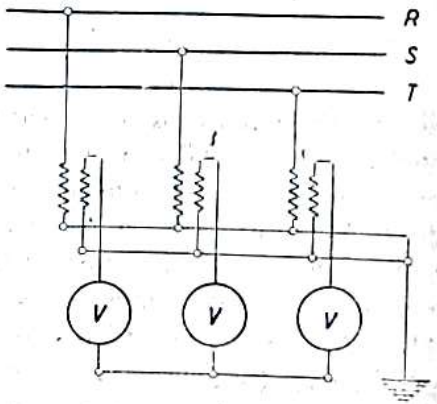
Najjednostavniji kontrolni uređaj zemljospoja sastoji se od tri jednake žarulje, spojene u zvijezdu između pojedinih faza i zemlje, prema slici 16. Kod normalnog pogona, s dobrom izolacijom prema

zemlji, otpada na svaku žarulju napon faze i sve tri žarulje svijetle jednako. Kad u jednoj fazi nastane zemljospoj, žarulja, priključena na tu fazu, kratko je spojena i ne svijetli, dok druge dvije svijetle mnogo jače, pod uticajem linijskog napona između dvije faze. To je znak, da u mreži imamo zemljospoj. Razumije se da moramo pri većim naponima uzeti dvije ili više žarulja vezanih serijski na jednu fazu, jer se žarulje izrađuju samo za napone do 220 V.



Slika 17. Kontrola izolacije mreže pomoću voltmetara

Umjesto žarulja upotrebljavaju se često voltmetri, prema slici 17., jer su osjetljiviji. Izolacija mreže je ispravna i jednaka kod sve tri faze, kada su otkloni kazaljki kod sva tri voltmetra jednaki, dok je najslabija izolacija one faze, kod koje kazaljka voltmetra pokaže najmanji otklon. Kod punog zemljospoja jedne faze, njezin voltmetar ne će pokazivati nikakav otklon. Ispitivanje možemo vršiti čak i jednim voltmetrom, kojega priključujemo na pojedine faze preko jedne preklopke. Istovremeno se mogu uključiti i signalne žarulje i truba. Kod zemljospoja može se, naravno, dio mreže u kvaru automatski iskopčati pomoću automatskih prekidača

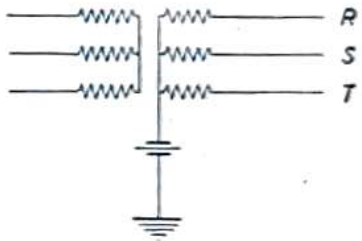


Slika 18. Kontrola izolacije mreže visokog napona

u transformatorskoj stanici, ili kod pojedinih mjesta napajanja. U većini slučajeva to nije dozvoljeno, jer bi na taj način prekinuli dobavljanje struje, a slučaj možda nije naročito težak. Kod visokog napona moramo, razumije se, voltmetre priključiti preko naponskih transformatora, na primjer prema slici 18. Većinom se za tu svrhu upotrebljavaju trofazni naponski transformatori s 5 stupova, umjesto 3 jednofazna transformatora.

Treba još upozoriti na činjenicu, da u mrežama s izoliranim zvjezdištem ne možemo uopće primijetiti zemljospoj bez kontrole izolacije. Mreža ostaje nesmetano u pogonu i u slučaju zemljospoja, s tom razlikom, da faza, koja ima zemljospoj, ima po cijeloj svojoj dužini potencijal zemlje, dok ostala dva fazna vodiča imaju prema zemlji linijski napon. Kad je stanje izolacije ispravno, sva tri fazna vodiča imaju prema zemlji fazni napon, odnosno, njihov se potencijal mijenja prema prelaznom otporu pojedinih faza prema zemlji.

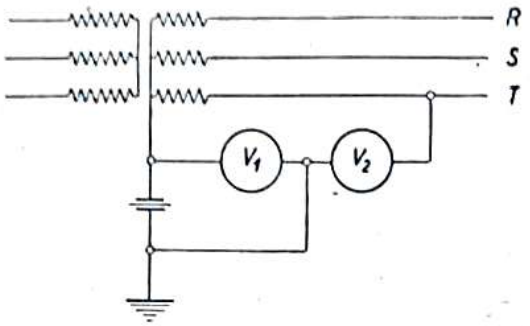
Slika 19. Razvodni sistem s izoliranim zvjezdištem, s probojnim osiguračem između zvjezdišta i zemlje



Ovdje moramo napomenuti, da je prema slici 19. u sistemu s izoliranim zvjezdištem između zvjezdišta i zemlje uključen naponski ili probojni osigurač. U normalnom pogonu probojni osigurač izolira zvjezdište prema zemlji. Kod kvara izolacije u transformatoru može se dogoditi da nisko naponski namotaji transformatora dođu u dodir s visokim naponom i da na taj način dobiju prema zemlji veći potencijal. Tada povećani napon probije probojni osigurač između zvjezdišta i zemlje i zvjezdište neposredno uzemlji. Na taj način zvjezdište nisko naponskog razvodnog sistema dobije potencijal zemlje, pa je spriječeno da dođe do nedozvoljeno velikog napona prema zemlji i vod visokog napona automatski se iskopča. Naponski osigurač obično je uključen između zvjezdišta i zemlje, a može biti i između faze i zemlje. Međutim, u svakom sistemu smije biti samo jedan naponski osigurač.

Uređaj za kontrolu stanja izolacije može kontrolirati i stanje naponskog osigurača. To pokazuje spoj prema slici 20.

Kod ispravnog stanja izolacije i naponskog osigurača oba voltmetra, V_1 i V_2, pokazuju polovinu faznog napona. Kod zemljospoja faze T voltmetar V_1 pokazuje fazni napon, a voltmetar V_2 ne pokazuje nikakav napon.

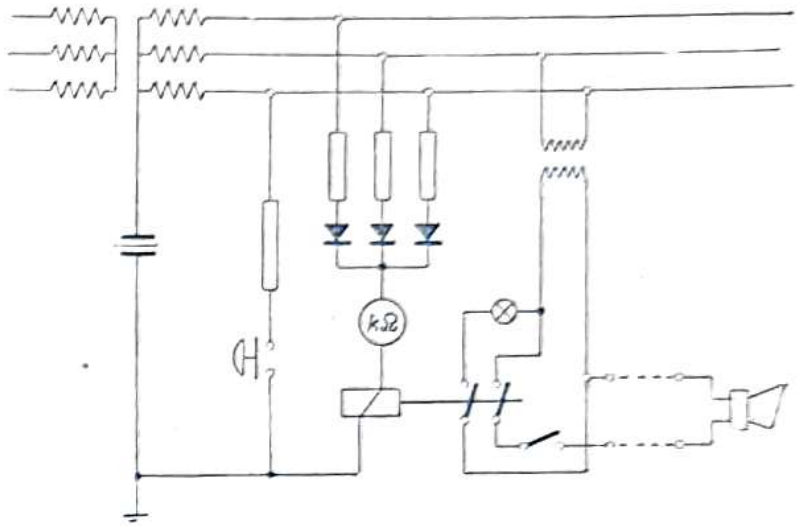


Slika 20. Kontrola izolacije i stanja naponskog osigurača pomoću voltmetra

Kod zemljospoja faza R ili S, voltmetar V_1 pokazuje fazni napon, a V_2 linijski napon. Kad je naponski osigurač probijen i na taj način zvjezdište uzemljeno, voltmetar V_1 ne pokazuje nikakav napon, a V_2 pokazuje fazni napon.

Razvodni sistem niskog napona upotrebljava se osobito u rudnicima, jer je opasnost zbog nepovoljnih radnih uslova i vlage vrlo velika. Zbog toga su za upotrebu u rudnicima izrađene i usavršene specijalne vrlo osjetljive kontrolne sprave za kontroliranje stanja izolacije mreže. Ugrađeni instrument stalno pokazuje otpor izolacije mreže, neovisno o njenom kapacitetu. Ako padne otpor izolacije ispod određene granice, ugrađena signalna žarulja to odmah pokaže, a istovremeno se uključuje i truba. Na taj se način upozorava na zemljospoj, odnosno na nedovoljni otpor izolacije, na primjer kad otpor padne ispod 20 kΩ. Električar iskopča trubu, mora odmah potražiti mjesto kvara izolacije i odmah ga otkloniti. Slika 21. prikazuje, na primjer, vezu takvog kontrolnog uređaja za kontrolu stanja izolacije.

Usmjerena struja kvara spojena je preko velikih otpora, osjetljivog instrumenta i releja sa zemljom. Kod prevelike struje kvara, to jest kod premalenog otpora izolacije mreže, relej uključi signalnu žarulju i trubu. Električar iskapča trubu pomoću prekidača. Između zvjezdišta i zemlje uključen je probojni naponski osigurač. S pokusnim tipkalom možemo preko jednog otpora proizvesti zemljospoj.



Slika 21. Shema spoja uređaja za kontrolu stanja izolacije mreže, s ugrađenim instrumentom, signalnom svjetiljkom i trubom

3. STEPEN OPASNOSTI I PREGLED ZAŠTITNIH MJERA

Prema svemu što je prije navedeno, stepen opasnosti ovisi jedino o dodirnom naponu. U prostorijama, gdje je dodirni napon malen, nije potrebna posebna zaštita, a gdje je dodirni napon velik, moramo se pobrinuti za veću sigurnost, sa posebnim zaštitnim mjerama, koje ćemo kasnije po redu obraditi i procijeniti. Dodirni napon je, naime, onaj napon, koji djeluje na naše tijelo i koji ne smije prekoračiti određenu vrijednost. Prema prijašnjim izlaganjima, dodirni napon ne smije prekoračiti visinu od približno 50 V, odnosno prema propisima raznih država 40 do 65 V. U daljnjim izlaganjima računat ćemo s dodirnim naponom od 50 V.

Dodirni napon lako određujemo od slučaja do slučaja mjerenjem, ili ga praktički procijenimo tako, da prostorije kategoriziramo prema prelaznim otporima, koji se u njima mogu očekivati. Razlikujemo suhe i vlažne prostorije, osim toga, treba voditi računa

o vrsti tla i o načinu i mogućnosti dodira metalnih dijelova, koji mogu doći pod napon u slučaju kvara na izolaciji električnih vodova. Tako razlikujemo *slučajni dodir* i *puno obuhvatanje predmeta*. Kod punog obuhvatanja metalnih dijelova hvatamo čvrsto, na primjer kad držimo električnu bušilicu ili uhvatimo metalnu ručicu električnog prekidača. Iz tabele I vidi se u kojim slučajevima su potrebne zaštitne mjere. Vidimo, na primjer, da sigurnosne mjere nisu nikada potrebne kod pogonskih napona ispod 50 V, a da su potrebne kad god je pogonski napon prema zemlji veći od 250 V. Kod pogonskih napona prema zemlji između 150 i 250 V zaštitne mjere su uvijek potrebne, osim u suhim prostorijama sa suhim podom, kao na primjer u sobama stanova. To isto vrijedi i za pogonske napone od 50 do 150 V, s tom razlikom, da u prostorijama s poluvodljivim podom, kao što su podovi od kamena ili betona, zaštitne mjere nisu potrebne, ako u njima ne možemo dohvatiti metalne dijelove, koji mogu doći pod napon.

Kod prosuđivanja stepena opasnosti neke prostorije, moramo na svaki način još odrediti imamo li u blizini električnih postrojenja dobro uzemljenih predmeta, kao što su, na primjer, cijevi vodova i kanalizacije i centralnog grijanja, te dijelovi uzemljenih metalnih konstrukcija. U tom je slučaju opasnost mnogo veća, pa su potrebne zaštitne mjere i u posve suhim prostorijama, kad su električni uređaji nadohvat takvih dobro uzemljenih predmeta. Na svaki način moramo nastojati smjestiti električnu instalaciju, a posebno utičnice i prekidače i druge stalno montirane strojeve i aparate tako, da se ne mogu istovremeno dohvatiti priključeni električni strojevi ili aparati i dobro uzemljeni metalni predmeti. Naročito je velika opasnost u kupaonici, zbog istog razloga, jer smo u kupaoničkoj kadi dobro uzemljeni, a otpor tijela je znatno umanjen zbog vlažnosti kože. Zbog toga su u kupaonicama neophodno potrebne zaštitne mjere ili se uopće ne smiju montirati utičnice. Propisi zahtijevaju da ni prekidač za rasvjetu ne smije biti nadohvat ruci iz kade, nego mora postojati potezni prekidač s vrpcom, montiran pod stropom. Ustvari bi trebalo zahtijevati da se u svim prostorijama, u kojima su dobro uzemljeni predmeti, kao vodovod ili radijatori centralnog grijanja, predvide zaštitne mjere i da u njima imamo takozvane utičnice sa zaštitnim kontaktom, o kojima ćemo kasnije govoriti.

Ponekad dolazi do neočekivanih napona, kojima su uzrok kvarovi na izolaciji, ili kvarovi na bilo kojem mjestu električne instalacije ili električnih uređaja, koji se prenose daleko kroz zgradu

radi nepotpune izolacije zidova, a naročito kroz metalne konstrukcije i naprave, kao što su betonske armature, vodovodni ili plinski cjevovodi i t. d. Tako se može dogoditi da kućna električna pumpa, koja se nalazi u podrumu ili čak izvan zgrade, dobije spoj s kućištem, te se napon kvara prenosi po cjevovodima priključene vodovodne instalacije kroz cijelu zgradu, ako je prelazni otpor između pumpe i zemlje dovoljno velik, što je moguće kad je voda čista, a ima veliki specifični otpor. Takvi kvarovi i nedostaci su izuzetni slučajevi i o njima se kod projektiranja ne može voditi računa.

Svako nas neočekivano elektriziranje upozorava da je nastao kvar na izolaciji električnih uređaja, kojega moramo potražiti i ukloniti, odnosno pobrinuti se za odgovarajuću zaštitu.

Potrebno je, dalje, da svi potrošači električne energije i uopće svi ljudi budu poučeni o opasnosti, koje prijete od električne struje. Osnovnu pouku o tome treba zapravo da dobijemo već u školi. Time, i potrebnim oprezom, spriječio bi se velik broj nesreća i ozljeda od električne struje.

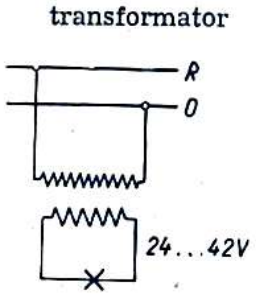
Vidjeli smo da postoji opasnost od nesreća prouzrokovanih strujom, kad dodirni napon prekorači određenu veličinu od približno 50 V. Da izbjegnemo tu opasnost, upotrebljavamo razne zaštitne mjere, koje sprečavaju opasnost na taj način, što neposredno smanjuju dodirni napon, ili se pobrinemo, da se u slučaju kvara na izolaciji nekog potrošača ovaj automatski isključi. Namjena zaštitnih mjera nije osiguranje priključenog trošila, jer su zato predviđeni osigurači i automatske sklopke. Njihova jedina namjena je, da se zaštite od nesreća ljudi, koji rade s tim trošilima, ili se nalaze u njihovoj blizini.

Zaštitnih mjera ima više. Samo se po sebi razumije, da nema nikakve opasnosti od električne struje, ako upotrebimo mali napon, ispod 50 V, na primjer 42 ili 24 V. Potpunim izoliranjem električnih trošila, odnosno osoba prema zemlji, možemo postići, razumije se, isto. Nadalje se zaštitne mjere sastoje u tome, da kućište, odnosno omotač trošila, spojimo sa zemljom ili nul-vodičem takozvanim zaštitnim uzemljenjem, odnosno nulovanjem. Kod toga je potrebno da osigurač ili automatska sklopka, koja osigurava dotično trošilo, isklopi, kad u slučaju kvara poteče dovoljno velike struja kvara, čime se sprečava nastajanje velikog i po život opasnog dodirnog napona. Konačno možemo upotrebiti razne zaštitne spojeve, kod kojih posebnim naponskim ili strujnim automatima postižemo to, da se oštećeno i za ljude opasno trošilo odmah isključi, čim dođe do kvara.

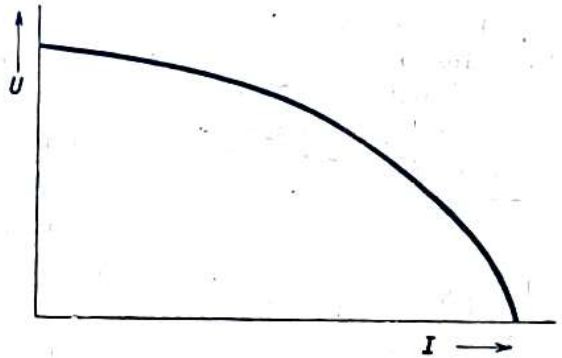
Pojedine zaštitne mjere ne mogu se upotrebiti u svakom slučaju. Svaka od navedenih mjera odgovara svojoj svrsi, pod određenim uslovima. Zato moramo pobliže upoznati svaku zaštitnu mjeru posebno, procijeniti ih i međusobno usporediti.

4. MALI NAPON

Mali napon daje izvanredno djelotvornu zaštitu i isključuje sam po sebi svaku opasnost. Upotrebljava se standardni napon od 24 ili 42 V, koji se može dobiti iz akumulatorske baterije ili pretvarača, a kod izmjenične struje pomoću transformatora, koji je na primarnoj strani priključen na pogonski napon, sl. 22. Takav trans-



Slika 22. Zaštitni



Slika 23. Padajuća vanjska karakteristika zaštitnog transformatora

formator naziva se zaštitni transformator i mora biti tako načinjen, da ne postoji opasnost da u slučaju kvara u njemu dobijemo na sekundarnoj strani primarni napon. Zato mora imati odvojeni primarni namotaj od sekundarnog namotaja. Osim toga mora biti siguran i u slučaju kratkog spoja, odnosno, da kod prevelikog opterećenja napon na sekundarnoj strani pada, tako da struja ne može prekoračiti granicu, koja bi bila opasna zbog zagrijavanja vodiča namotaja. Takav zaštitni transformator ima takozvanu padajuću vanjsku karakteristiku, sl. 23. Obično se izrađuju prenosivi zaštitni transformatori, a priključujemo ih na primarnoj strani na utičnicu pogonskog napona. Ako imaju još i metalni omotač, moraju i sami biti posebno zaštićeni na primjer uzemljenjem. Na njega priključujemo najviše nekoliko svjetiljki na ugrađene utičnice. Žarulje prenosnih svjetiljki su, razumije se, izrađene za niski napon i ne smiju

imati utikače, koji se mogu uključiti u normalne utičnice većeg napona. Zbog toga utikač mora biti izrađen drukčije nego utikač za normalni pogonski napon, da do zamjene uopće ne može doći. Takav utikač ima, na primjer, koncentrične kontakte ili u većini slučajeva dodatni središnji čep, koji nije priključen, nego mrtav. Za veće snage izrađuju se zaštitni transformatori za stalnu montažu, s vlastitom niskonaponskom razvodnom mrežom, koja može biti izvedena samo na male udaljenosti, zbog malog napona.

Zbog toga se zaštitni transformatori, odnosno niski naponi, upotrebljavaju samo tamo, gdje je opasnost vrlo velika, kao na primjer u metalskim radionicama, u kotlovnicama i u sličnim pogonima, gdje moramo raditi na metalnim dijelovima, posredstvom kojih smo dobro uzemljeni.

Često se na takve niske napone priključe mala trošila, na primjer lemila, električne ručne bušilice i t. d. Za veća trošila veće snage niski napon kao zaštitna mjera nije prikladan, jer bismo morali imati vrlo velike presjeke vodiča.

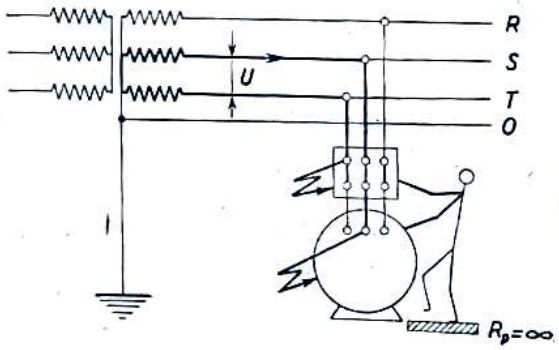
5. IZOLIRANJE

Izoliranje, kao zaštitna mjera, može se primijeniti na više načina. Pojedina trošila izrađujemo na taj način, da ih potpuno izoliramo, da se ne može doći u dodir s metalnim dijelovima, koji bi mogli pasti pod napon kod eventualnog kvara na izolaciji. Izoliranje, razumije se, mora biti izvedeno potpuno, dosljedno i pouzdano. Ne smijemo dopustiti da izolacija bude toliko nedovoljna ili konstruktivno tako izvedena, da se može u normalnom pogonu brzo oštetiti i učiniti dostupnim unutarnje metalne dijelove, koji mogu doći pod napon. Naročito se mora paziti da vijci ili drugi metalni dijelovi ne prodru kroz vanjsko zaštitno izolaciono kućište do unutarnjih metalnih dijelova, koji su pod naponom.

Izolirati se mogu samo manji aparati, kao što su, na primjer, sušila za kosu, električni aparati za šišanje i brijanje, male bušilice i t. d. Kod većih aparata može se izolirati samo unutarnji električni dio prema ostalim dijelovima aparata, na primjer kod električnih motora, pri čemu moramo upotrebljavati odgovarajuće umetke od izolacionog materijala. Takav način zaštite vrlo je djelotvoran, razmjerno lako izvodiv i zbog toga ima veliku budućnost.

U novije vrijeme primjenjuje se takozvano dvojno izoliranje. Pritom se zbog potpunije sigurnosti izvode dvije uzastopne izolacije, na primjer na taj način, što se metalna ručica prekidača obloži izolacijskom oblogom, a njena je osovina još povezana sa sklopkom izolacionim materijalom, koji čini osovinu samog prekidača. U tom je slučaju dozvoljeno da trošila sa zaštitnom izolacijom imaju vanjske metalne dijelove koji, razumije se, moraju biti dobro izolirani od dijelova pod naponom, ili koji mogu doći pod napon u slučaju kvara.

Zaštitna mjera izoliranjem također je djelotvorna, ako trošila odmaknemo od prostora, koji je lako dohvatljiv, na primjer neki električni motor, tako da bez pomoćnih sredstava nije pristupačan. Tako ga, na primjer, možemo montirati na konzolu na zidu ili ga možemo obložiti drvenim zaštitnim poklopcem, koji ne smije ometati normalno hlađenje električnog motora, a sprečava dodir s njime.



Slika 24. Spoj s kućištima u dvijema fazama opasan je u dohvatljivoj blizini unatoč izolacionoj podlozi

Daljnji način izoliranja sastoji se u tome da čovjeka, izloženog opasnosti od električne struje, izoliramo prema zemlji. Za tu svrhu upotrebljavamo podloge od izolacionog materijala, u prvom redu od gume. Pri tome treba biti oprezan, jer se takve podloge upotrebom istroše ili oštete, pa ne mogu više odgovoriti svojoj svrsi. Zato nije preporučljivo hodati po takvim podlogama u okovanim cipelama. Međutim i pored izolacione podloge postoji opasnost od električnog udara, ako s istog mjesta možemo dodirnuti razne metalne dijelove, koji mogu prigodom kvara na izolaciji dobiti različite napone prema zemlji. To pokazuje slika 24., prema kojoj kućište prekidača ima spoj s fazom *T*, a kućište motora s fazom *S*. Ako istovremeno dodirnemo oba kućišta, poteći će kroz naše tijelo, zbog linijskog napona između faza *U*, struja kvara, iako smo potpuno

izolirani prema zemlji. Struju kvara određuje samo otpor čovječjeg tijela i ona će biti

$$I_k = \frac{U}{R_t},$$

jer i u ovom slučaju možemo zanemariti sve ostale otpore. U ovom slučaju poteći će struja kvara bez obzira da li je zvjezdište mreže izolirano ili nije. Zbog toga je u takvom slučaju potrebno da pojedini metalni dijelovi strojeva, prekidači i drugi uređaji budu jedan od drugog toliko udaljeni, da ih ne možemo istovremeno dodirnuti.

Ako to nije moguće izvesti, svi metalni dijelovi, koji bi mogli doći pod napon uslijed kvara na izolaciji, moraju biti međusobno povezani. O tome ćemo dalje opširnije raspravljati. Zbog toga je i izoliranje pomoću podloge ili omotača samo zaštitna mjera iz nužde, koja nije sasvim sigurna, a primjenjuje se samo kao dopunska zaštita. To isto vrijedi i u pogledu upotrebe gumenih rukavica.

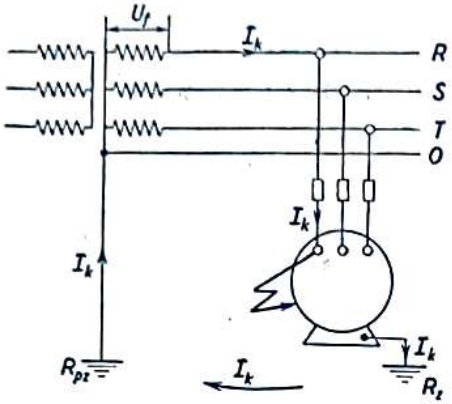
6. ZAŠTITNO UZEMLJENJE

Od svih zaštitnih mjera danas se najviše upotrebljava z a š t i t n o u z e m l j e n j e. Ono se sastoji u tome, da povežemo kućište trošila, odnosno sve metalne dijelove električnih naprava, neposredno sa zemljom zbog toga, da kod kvara na izolaciji poteče struja kvara tolike jačine, da se dodirni napon smanji na neopasnu veličinu, odnosno, da osiguranje stupi u djelovanje, t. j. da osigurači ili automati, koji osiguravaju vodove i trošila, iskopčaju dio mreže, koja je u kvaru. Ako nastupi kvar na izolaciji, koji bi prouzrokovao opasni napon između metalnog omotača, trošila i zemlje, trošilo se odmah isklopi, a pregorjeli osigurači, odnosno isklopljeni automat upozori nas da postoji kvar, t. j. kratak spoj ili spoj s masom, odnosno preopterećenje. U svakom slučaju odmah je potrebno ustanoviti zašto je nastao kvar, a zatim ga treba otkloniti. U drugim slučajevima zaštitnim uzemljenjem postižemo to, da opasni dodirni napon uopće ne može nastati.

Prednosti i nedostatke pravilnog uzemljenja izložit ćemo potanje kod razvodnog sistema s uzemljenim zvjezdištem i kod sistema s izoliranim zvjezdištem.

a) Zaštitno uzemljenje u mrežama s uzemljenim zvjezdištem

Na slici 25. prikazan je princip spoja zaštitnog uzemljenja. Kao što vidimo, kućište električnog motora ili metalni dio nekog drugog trošila neposredno je uzemljen uzemljivačem, čiji je prelazni otpor prema zemlji R_z.



Slika 25. Zaštitno uzemljenje

Kod kvara na izolaciji teče struja kvara I_k kroz fazu, zatim kroz kućište trošila u zemlju i dalje kroz pogonsko uzemljenje s prelaznim otporom R_{pz} u centrali ili u transformatorskoj stanici natrag u zatvorenom strujnom krugu, u kojem djeluje fazni napon U_f mreže. Struja kvara neka bude tako velika, da pregori osigurač uključen u dotičnom strujnom krugu da zaštiti trošilo, a da pritom dodirni napon ne postane opasno velik. Moramo, dakle, zahtijevati da bude

$$I_0 < I_k,$$

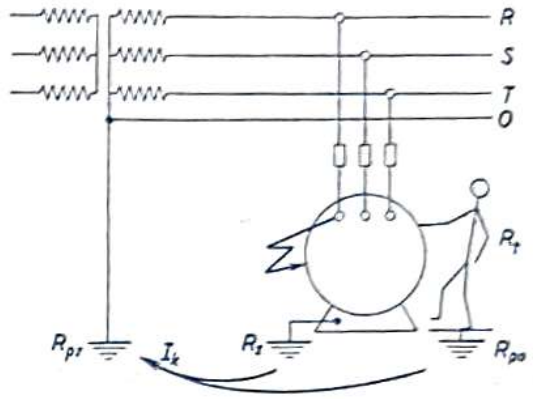
ako je I_0 struja, kod koje osigurač doista pregori, odnosno automat iskopča. Struja kvara teče kroz zaštitno uzemljenje i zbog pada napona u njemu kućište zaštićenog trošila dobije prema zemlji napon kvara

$$U_k = I_k \cdot R_z.$$

Ako dodirnemo kućište trošila, prema sl. 26., poteći će struja kvara paralelno i kroz zaštitno uzemljenje i kroz naše tijelo. U jednoj grani imamo prelazni otpor R_z zaštitnog uzemljenja, a u drugoj otpor čovječjeg tijela R_t i prelazni otpor R_{po} prema zemlji, što prikazuje nadomjesni spoj na slici 27. Napon kvara jednak je

padu napona u otporu čovječjeg tijela i u prelaznom otporu R_{po} kod struje I_t:

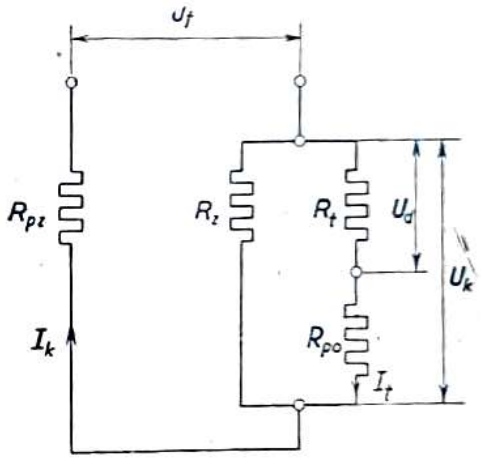
$$U_k = I_t \cdot (R_t + R_{po}).$$



Slika 26. Dodir trošila koji ima kvar na izolaciji i izvedeno zaštitno uzemljenje

Dodirni napon je, dakle

$$U_d = I_t \cdot R_t = U_k \frac{R_t}{R_t + R_{po}}.$$



Slika 27. Nadomjesna shema spoja za slučaj prikazan na slici 26.

U najnepovoljnijem slučaju prelazni otpor između čovjeka i zemlje je neznatan, a dodirni napon je tada jednak naponu kvara

$$U_{d\,max} = U_k \text{ kod } R_{po} = 0.$$

Prema našem zahtjevu dodirni napon ne smije biti veći od 50 V. Kad struja kvara naraste do tolike jačine, da bi dodirni napon

bio 50 V, osigurač mora isklopiti. Moramo, dakle, zahtijevati da bude

$$U_k = I_0 \cdot R_z < 50,$$

iz čega proizlazi, da bi prelazni otpor zaštitnog uzemljenja smio biti najviše

$$R_z < \frac{50}{I_0}.$$

Taj izraz je potpuno točan i zahtijeva vrlo mali prelazni otpor. Propisi mnogih država su tolerantniji. Zahtijevaju samo da osigurač mora sigurno isklopiti, kad kućište trošila dobije puni fazni napon prema zemlji. U tom slučaju je struja kvara dana izrazom

$$I_0 = \frac{U_f}{R_{pz} + R_z + R_v},$$

gdje je R_v otpor voda jedne faze od njegovog početka do mjesta kvara. Struja iskapčanja osigurača mora, dakle, biti

$$I_0 < \frac{U_f}{R_{pz} + R_z + R_v}.$$

Iz toga se vidi, da bismo za dimenzioniranje zaštitnog uzemljenja morali znati otpor pogonskog uzemljenja i faznog vodiča od njegova početka do mjesta kvara. Svaki pojedini potrošač obično izvodi posebno pogonsko uzemljenje, koje se ne može izvoditi prema kompliciranom obrascu u kojemu su sadržane njemu nepoznate vrijednosti, kao što su veličina prelaznog otpora pogonskog uzemljenja mreže i otpor vodiča. Zato se naš gornji obrazac mora pojednostavniti tako, da određuje najveći dozvoljeni prelazni otpor zaštitnog uzemljenja

$$R_z < \frac{U_f}{I_0} - (R_{pz} + R_v).$$

Kao što ćemo vidjeti kasnije, pogonsko uzemljenje u transformatorskoj stanici ili u električnoj centrali mora biti najmanje toliko dobro, koliko i uzemljenje pojedinih trošila, bez obzira na to, što elektrana lakše izvodi dobro uzemljenje. Ako dakle odredimo, da prelazni otpor pogonskog uzemljenja i otpor vodiča jedne faze od njegova početka do mjesta na kojemu je priključeno

trošilo budu najviše jednaki prelaznom otporu zaštitnog uzemljenja, odnosno

$$R_z + R_{pz} + R_v \leq 2 \cdot R_z,$$

dobit ćemo jednostavniji izraz

$$R_z < \frac{U_f}{2 \cdot I_0},$$

kojega navode propisi raznih država za dimenzioniranje zaštitnog uzemljenja. Taj izraz omogućuje da kod uobičajenog napona 380/220 V trofazne struje prelazni otpor bude približno dva puta veći nego pomenuti prvi stroži izraz.

Ako, dakle, dimenzioniramo zaštitno uzemljenje prema tome izrazu, najveći mogući dodirni napon bit će

$$U_d = I_0 \cdot R_z = \frac{U_f}{2}.$$

Kod pogonskog napona 380/220 V, na primjer, možemo dobiti trajni dodirni napon do 110 V, a da osigurač ne isključi. Moramo pritom imati na umu, da takvim dimenzioniranjem zaštitnog uzemljenja, istina, smanjujemo opasnost od električnih nesreća, ali nikada ne postižemo potpunu zaštitu u smislu naših prijašnjih zahtjeva.

Tako vidimo, da zaštitnim uzemljenjem u svakom slučaju smanjujemo dodirni napon. Bez zaštitnog uzemljenja dodirni napon u najnepovoljnijem slučaju može biti jednak faznom naponu, dakle

$$U_d' = U_f \text{ kod } R_z = \infty.$$

Ako pak imamo zaštitno uzemljenje struja kvara, prema slici 25 bit će

$$I_k = \frac{U_f}{R_{pz} + \dfrac{R_z \cdot (R_t + R_p)}{R_z + (R_t + R_p)}}.$$

U najnepovoljnijem slučaju prelazni otpor između čovjeka i zemlje je nula ($R_p = 0$). Dalje, u drugom nazivniku možemo ispustiti i prelazni otpor zaštitnog uzemljenja R_z, koji je neznatan u poređenju s relativno velikim otporom R_t čovječjeg tijela.

($R_z \ll R_t$). Na taj ćemo način dobiti za struju kvara jednostavniji izraz

$$I_k \simeq \frac{U_f}{R_{pz} + R_z}.$$

Ona će prouzrokovati dodirni napon

$$U_d = U_f \cdot \frac{R_t \cdot R_z}{(R_{pz} + R_z) \cdot (R_t + R_z)} \simeq U_f \cdot \frac{R_z}{R_{pz} + R_z},$$

jer u drugom faktoru nazivnika opet možemo zanemariti prelazni otpor R_z zaštitnog uzemljenja, koji je neznatan u odnosu na otpor čovječjeg tijela.

Sa zaštitnim uzemljenjem smanjujemo, dakle, dodirni napon u razmjeru

$$\delta = \frac{U_d}{U_d'} = \frac{R_z}{R_{pz} + R_z}.$$

Zbog toga, što je prelazni otpor R_z zaštitnog uzemljenja u praksi uvijek veći od prelaznog otpora R_{pz} pogonskog uzemljenja, taj razmjer ima obično vrijednost $0{,}6 < \delta < 0{,}8$ i prema tome nije naročito povoljan.

Zanimljivo je, da željeni mali dodirni napon postižemo u svakom slučaju i onda, kad je prelazni otpor pogonskog uzemljenja veći od prelaznog otpora zaštitnog uzemljenja. U strujnom krugu kvara djeluje cjelokupni napon faze U_f, i najveći dio pada napona nastaje u prelaznim otporima zaštitnog i pogonskog uzemljenja, jer su ostali otpori prema njima većinom maleni i u računu ih možemo izostaviti. Prema tome je

$$U_f = I_k \cdot (R_{pz} + R_z),$$

kod čega je dodirni napon u najnepovoljnijem slučaju

$$U_d = I_k \cdot R_z = U_f \cdot \frac{R_z}{R_{pz} + R_z}.$$

Zbog toga treba da bude

$$U_f \cdot \frac{R_z}{R_{pz} + R_z} < 50,$$

iz čega proizlazi, da odnos između oba otpora treba da bude

$$\frac{R_z}{R_{pz}} < \frac{50}{U_f - 50}.$$

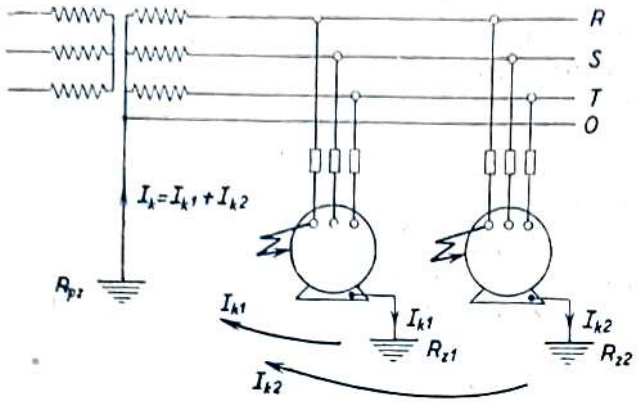
Kod uobičajenog napona 380/220 V trofaznog razvodnog sistema, prelazni otpor zaštitnog uzemljenja morao bi biti bar 3 do 4 puta manji od prelaznog otpora pogonskog uzemljenja zvjezdišta sistema, što važi podjednako za sva zaštitna uzemljenja svih pojedinačnih trošila, koja imaju zaštitno uzemljenje. Taj zahtjev je sam po sebi teško izvodiv. Pogonsko uzemljenje moralo bi imati veliki prelazni otpor u odnosu na zaštitno uzemljenje i zbog toga je razumljivo, da će zvjezdište sistema, a s time u vezi i neutralni vodič, dobiti napon prema zemlji, najmanje fazni napon, umanjen za 50 V, a to je kod 380/220 V napon od 170 V. Istovremeno bi fazni vodiči dobili napon prema zemlji, koji bi prekoračio dozvoljenu veličinu 250 V. To je, razumije se, nedopustivo. Taj način dimenzioniranja pogonskog i zaštitnog uzemljenja može se eventualno primijeniti kod manjih napona, na primjer 220/125 V. U tom bi slučaju neutralni vodič, kad nastupi kvar na izolaciji, dobio prema zemlji napon od samo 75 V, što bi se još moglo u iznimnom slučaju dozvoliti, a napon faznih vodiča prema zemlji ne bi nikada prekoračio dozvoljenu granicu 250 V. Budući da eventualne kvarove moramo što prije otkloniti, pa i onda, kad nisu opasni, moramo zahtijevati da osigurač isključi čim nastane kvar.

I u tom slučaju bismo opet morali zahtijevati male prelazne otpore pogonskog i zaštitnih uzemljenja. Zbog svih tih poteškoća taj način dimenzioniranja uzemljenja gotovo se uopće ne upotrebljava, a naveli smo ga samo zato, da dobijemo potpuniji pregled.

Pogledajmo sada kakve posljedice ima istovremeni spoj sa zemljom kod više uzemljenih trošila. Kad dođe do spoja sa zemljom zbog kvara na izolaciji iste faze kod dva trošila, tada će struje kvara teći u određenom trenutku u istom smjeru i paralelno k pogonskom uzemljenju mreže, kako je prikazano na sl. 28.

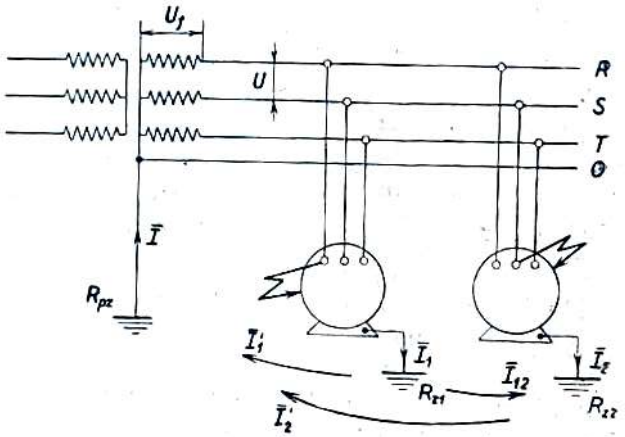
Ukupna struja kvara kroz pogonsko uzemljenje veća je i zbog toga će prelazni otpor pogonskog uzemljenja preuzeti i veći dio ukupnog faznog napona, nego u slučaju zemljospoja kod samo jednoga trošila. U tom slučaju će i dodirni napon kod oba trošila biti manji.

Sasvim drugačije stanje nastupiti će kad dođe istovremeno do zemljospoja kod oba trošila, a na dvjema različitim fazama, prema slici 29, prema kojoj uzemljeno kućište prvog trošila ima spoj s fazom R, a uzemljeno kućište drugog trošila s fazom S.



Slika 28. Dvostruki zemljospoj iste faze u mreži s uzemljenim zvjezdištem

Na slici odmah vidimo da između zaštitnog uzemljenja pojedinog trošila i pogonskog uzemljenja djeluje fazni napon U_f odgovarajuće faze, a u strujnom krugu, koji je zatvoren između faza sa zemljospojom preko zaštitnih uzemljenja i zemlje, djeluje



Slika 29. Dvostruki zemljospoj na raznim fazama, na dva trošila, u mreži s uzemljenim zvjezdištem

linijski napon U. Dio $\bar{I}_1'$ struje zemljospoja $\bar{I}_1$ prvoga trošila teče kroz zemlju prema pogonskom uzemljenju, drugi dio $\bar{I}_{12}$ teče k zaštitnom uzemljenju drugog trošila. Od zaštitnog uzemljenja drugog trošila teče struja prema pogonskom uzemljenju. Kroz

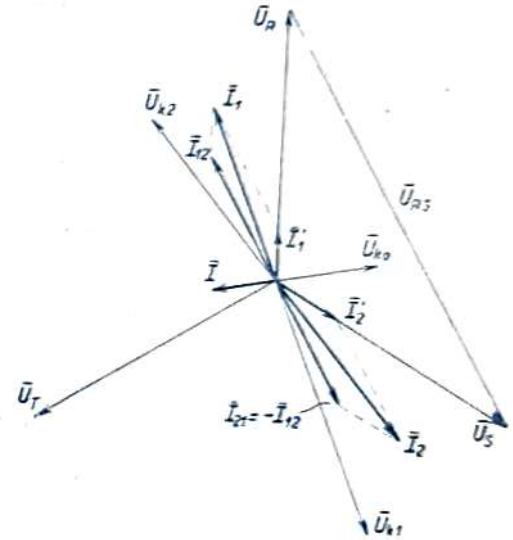
pogonsko uzemljenje teče u cjelini struja $\bar{I}$. Najbolji pregled dobivamo ako nacrtamo vektorski dijagram prema slici 30. Da bi pregled za ovaj slučaj bio jednostavniji, i ovajput ćemo izostaviti induktivni otpor strujnog kruga. Pod djelovanjem napona R_k faze R, teče u fazi s tim naponom komponenta $\bar{I}_1$ struje zemljospoja prvog trošila. Isto tako teče struja $\bar{I}_2'$ pod djelovanjem faznog napona $\bar{U}_S$ kod drugog trošila. Budući da mora biti

$$\bar{I}_1' + \bar{I}_2' + \bar{I} = 0$$

struja $\bar{I}$, koja teče kroz pogonsko uzemljenje, bit će

$$\bar{I} = -\bar{I}_1' - \bar{I}_2',$$

ako gledamo od toga uzemljivača prema zemlji. Moramo još odrediti struju $\bar{I}_{12}$, koja teče između oba zaštitna uzemljenja.



Slika 30. Vektorski dijagram dvostrukog zemljospoja

Ovdje moramo biti pažljivi. Kad gledamo u smjeru od prvog trošila prema zemlji, vidimo da u tom strujnom krugu djeluje linijski napon $\bar{U}_{RS}$, koji ima za naš smjer gledanja vrijednost $\bar{U}_R - \bar{U}_S$. U fazi s tim naponom teče struja $\bar{I}_{12}$. Kroz prvo trošilo teče struja $\bar{I}_1$ u zemlju. Ona je dana vektorskim zbrojem struja $\bar{I}_1'$ i $\bar{I}_{12}$, to jest

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_1' + \bar{I}_{12}.$$

Ako hoćemo analogno odrediti struju, koja teče kroz drugo trošilo u zemlju, moramo gledati u smjeru od toga trošila prema

zemlji. Vidimo, da je u tom strujnom krugu linijski napon $\bar{U}_{RS} = \bar{U}_S - \bar{U}_R$, i u fazi s tim naponom ima struja između oba zaštitna uzemljenja smjer suprotan prijašnjem smjeru struje i data je vektorom $\bar{I}_{21} = -\bar{I}_{12}$. Ta struja i struja $\bar{I}_2'$ daju zajedno traženu struju zemljospoja $\bar{I}_2$ drugoga trošila, dakle

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_2' - \bar{I}_{12}.$$

U prelaznom otporu R_{z1} zaštitnog uzemljenja prvog trošila nastat će pad napona, jednak naponu kvara

$$\bar{U}_{k1} = -\bar{I}_1 \cdot R_{z1}$$

i nalazi se u protu-fazi sa strujom $\bar{I}$ zemljospoja toga trošila. Na isti način nastat će i napon kvara

$$\bar{U}_{k2} = -\bar{I}_2 \cdot R_{z2}$$

kod drugog trošila. Kod toga, razumije se, razlika između oba napona kvara jednaka je linijskom naponu između faza, to jest

$$\bar{U}_{k1} - \bar{U}_{k2} = -\bar{U}_{RS} = \bar{U}_{SR}$$

ili

$$\bar{U}_{k2} - \bar{U}_{k1} = -\bar{U}_{SR} = \bar{U}_{RS}.$$

Iz toga vidimo da je napon kvara kod jednog od dva trošila neizbježivo veći od polovine linijskog napona, odnosno, u najpovoljnijem slučaju jednak polovini linijskog napona između faza. Dodirni napon, koji u najnepovoljnijem slučaju može dobiti veličinu napona kvara, također je kod jednog od trošila nedozvoljeno velik.

Zvjezdište i neutralni vodič dobivaju u tom slučaju dvostrukog zemljospoja napon prema zemlji, koji iznosi

$$\bar{U}_{ko} = -\bar{I} \cdot R_{pz},$$

kod čega moraju biti ispunjeni uslovi

$$\bar{U}_R + \bar{U}_{k1} = \bar{U}_{ko},$$

i

$$\bar{U}_S + \bar{U}_{k2} = \bar{U}_{ko}.$$

Zvjezdište ima dakle prema zemlji napon

$$\bar{U}_{ko} = \frac{\bar{U}_{k1} + \bar{U}_{k2} - \bar{U}_T}{2}.$$

Zbog velikog dodirnog napona, koji će se pojaviti barem kod jednog trošila, opet je nužno potrebno da osigurači sigurno isključe i tako prekinu spoj sa zemljom. Zato se moramo uvjeriti da li osigurači i u slučaju dvostrukog zemljospoja doista iskapčaju, što znači, da li tada kroz trošila teče veća struja kvara, nego u slučaju zemljospoja samo na jednom trošilu. I u tom slučaju, naime, pod djelovanjem faznog napona teče struja zemljospoja samo pod djelovanjem faznog napona u strujnom krugu, koji sačinjava zaštitno uzemljenje trošila s kvarom i pogonsko uzemljenje i jednaka je komponenti $\bar{I}_1'$ ili $\bar{I}_2'$, iz prijašnjeg primjera dvostrukog zemljospoja, već prema tome, na kojemu je od dva trošila došlo do kvara. Iz našega vektorskog dijagrama na sl. 30. vidljivo je, da je struja zemljospoja $\bar{I}_1$, odnosno $\bar{I}_2$, uvijek veća od navedenih odgovarajućih komponenata i prema tome također veća i od struje kvara zemljospoja jednog trošila. Ako, dakle, dimenzioniramo zaštitno uzemljenje svakog pojedinog trošila prema datim uputstvima, tako da osigurač odmah isklopi u slučaju zemljospoja na jednom trošilu, onda možemo biti sigurni da će osigurač isklopiti i u slučaju zemljospoja na dva trošila. Ukoliko osigurač jednoga trošila isklopi nešto prije, imamo opet slučaj jednoga zemljospoja kod drugoga trošila, kojega njegov osigurač također treba da isklopi. Tako vidimo, da kod dimenzioniranja zaštitnog uzemljenja ne treba posebno voditi račun o slučaju istovremenog zemljospoja na dva trošila.

Već nam je poznato, da u naš obrazac moramo staviti struju osigurača I_o, a to je ona struja, kod koje osigurač zaista isključi. Poznato je, da osigurač pregara istom kod znatno veće struje, nego što je njegova nazivna struja. Odnos struje isključivanja i nazivne struje kod slabijih osigurača je veći, a kod jačih manji. Općenito vrijedi, da obični osigurači smjesta pregaraju kod struje 3 do 5 puta veće od nazivne struje, tako da je

$$I_o = (3 \ldots 5) \cdot I_{no} \text{ kod običnih osigurača,}$$

ako označimo s I_{no} nazivnu struju običnog osigurača. Tromi osigurači, koji se sve više upotrebljavaju, izdržavaju malena preopterećenja razmjerno dosta dugo. Zbog opasnosti od električne struje moramo zahtijevati da se trošilo isklopi u vrlo kratkom vremenu po nastanku kvara, s tim, da tromi osigurači brzo pregore istom kod struje, koja je šest puta veća od nazivne struje osigurača, tako da je

$$I_o = (6 \ldots 8) \cdot I_{no} \text{ kod tromih osigurača.}$$

Automatski prekidači iskapčaju uslijed djelovanja elektromagneta kod struje kratkog spoja. Oni su, osim toga, još opremljeni i termičkim okidačem, koji iskopča kod manjih opterećenja, kad traju relativno duže vremena. Za našu svrhu upotrebljiv je elektromagnetski okidač za iskapčanje kratkog spoja, koji kod raznih automata djeluje kod različitih preopterećenja, već prema konstrukciji samog automata. Elektromagnetski okidači kratkog spoja djeluju obično kod preopterećenja 8 do 15 puta većih od nazivne struje automata, koji se mogu postepeno regulirati. Kod manjih dugotrajnih opterećenja iskapčaju termički okidači s velikim zakašnjenjem. Budući da bi zbog opasnosti od električne struje trošilo s kvarom moralo biti iskopčano u vrlo kratkom vremenu, recimo opet u 0,2 s, elektromagnetski okidač kratkog spoja morao bi iskopčati u tom vremenu, odnosno, mora biti

$$I_0 = (8 \ldots 15)\, I_{n0} \cdot \text{ kod automatskog prekidača,}$$

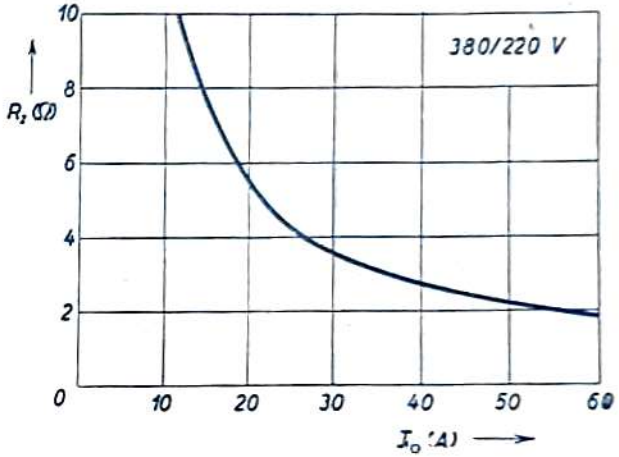
kod čega računamo s pravom vrijednošću faktora, prema uputstvima proizvođača, odnosno prema podacima izvršenih mjerenja. Razumije se, da ćemo okidače kratkog spoja regulirati tako, da oni iskapčaju kod što manje struje iskapčanja, ali tako, da ne iskapčaju kod najveće pogonske struje. Iz toga se vidi da su automatski prekidači ustvari nepovoljni, ako hoćemo upotrebiti zaštitno uzemljenje, jer iskapčaju istom kod razmjerno velike struje, a kod manjih opterećenja još i s velikim zakašnjenjem. Osim toga moramo, zbog relativno malog broja tipova za osiguranje motora ili drugoga trošila, često uzeti automate sa znatno većom nazivnom strujom, nego što je neophodno potrebno. U tom slučaju moramo regulirati termički ili elektromagnetski okidač na potrebnu jačinu struje. S obzirom na sve gore navedeno dobili bismo, prema našim obrascima, male prelazne otpore zaštitnih uzemljenja, kako u slučaju upotrebe tromih osigurača, tako i automata.

Postavlja se pitanje, da li je neophodno potrebno da osigurači iskapčaju u tako kratkom vremenu, ili je dovoljno ako sigurno iskopčaju s nekim zakašnjenjem. Poznato nam je, da je opasnost od električne struje to veća, što duže teče kroz čovječje tijelo. Ako tražimo da osigurač isklopi čim nastane zemljospoj, možemo biti sigurni da do nesreće ne će doći. Ako se zadovoljimo time da isklopi sa zakašnjenjem, u kom slučaju napon kvara može potrajati više minuta, onda u tom vremenu mogu nastati teške posljedice, ali ipak postižemo to, da trošilo ne može imati trajni napon kvara prema

zemlji. U kratkom vremenu od nastanka kvara do iskapčanja sa zakašnjenjem dolazi bez sumnje vrlo rijetko do dodira, i zbog toga nije veliki propust ako se zadovoljimo zahtjevom kod svih vrsta osigurača, običnih tromih, kao i kod automata, da u slučaju zemljospoja sigurno iskapčaju i da se ne obaziremo na trajanje zakašnjenja. Moramo ipak imati na umu da zaštita nije potpuna. Općenito za sve osigurače vrijedi

$$I_0 = 3 \cdot I_{n0}.$$

Kako ćemo vidjeti kasnije, vrlo je teško načiniti dobro uzemljenje s vrlo malim prelaznim otporom. Ako hoćemo dobiti prelazni otpor manji od 5 Ω, moramo uložiti veliki napor, a prelazni otpor od 2 Ω može se ostvariti vrlo teško i troškovi za takvo uzemljenje često su dosta veliki.



Slika 31. Najveći dozvoljeni prelazni otpor R_z zaštitnog uzemljenja u ovisnosti o struji iskapčanja osigurača I_0, kod trofaznog sistema 380/220 V

Iz dijagrama na sl. 31. možemo lako dobiti najveće dozvoljene prelazne otpore R_z zaštitnog uzemljenja u ovisnosti o struji iskapčanja osigurača, ako dimenzioniramo zaštitno uzemljenje prema općenito upotrebljavanom obrascu

$$R_z \leq \frac{U_f}{2 \cdot I_0}$$

kod trofaznog razvodnog sistema s uzemljenim zvjezdištem napona 380/220 V. Odmah se vidi da je zaštitno uzemljenje s posebno nači-

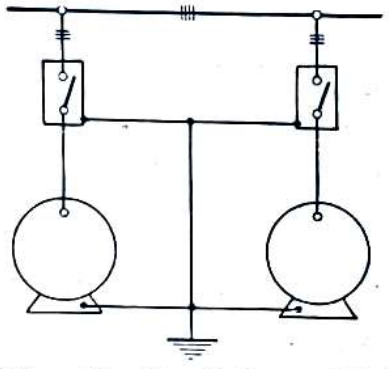
njenim uzemljivačima prikladno samo za trošila do neke najveće snage, jer bi za veća trošila bili potrebni tako mali prelazni otpori, da bi ih bilo vrlo teško ostvariti. Zato se zaštitno uzemljenje može primjeniti samo za trošila, za koja je u najnepovoljnijem slučaju dovoljan prelazni otpor 2 Ω. Tako dobijemo najveću struju iskapčanja osigurača zaštićenoga trošila kod 2 Ω prelaznog otpora zaštitnog uzemljenja

$$I_0 = \frac{220}{2 \cdot 2} = 55 \text{ A},$$

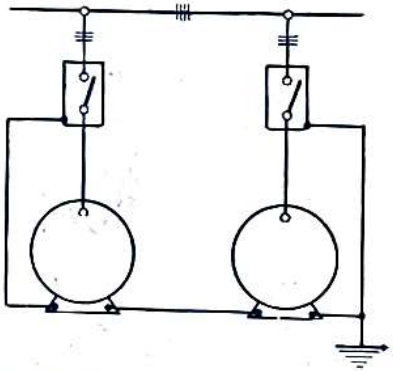
što odgovara, ako se zadovoljimo doista pouzdanim tromim iskapčanjem, nazivnoj struji iskapčanja

$$I_{no} = \frac{I_0}{3} = \frac{55}{3} = 18{,}4 \approx 20 \text{ A}.$$

Taj je rezultat zaokružen na nazivne struje postojećih osigurača. Toliku struju trebaju motori približne snage 10 kW. Dozvoljena snaga trošila često je manja, jer moramo upotrebiti osigurače većih dimenzija, zbog znatno većih struja, koje nastaju kod pokretanja električnih motora. U tim slučajevima možemo proći s manjom nazivnom strujom osigurača, ako uzimamo trome osigurače ili automate, a taj način osiguranja je i pravilniji.



Slika 32. Pravilni paralelni priključak pojedinih kućišta na vod za uzemljenje



Slika 33. Nepravilni serijski priključak pojedinih kućišta na vod za uzemljenje

Iz svega toga se vidi, da su pojedinačna zaštitna uzemljenja primjenljiva samo za mala trošila, koja trebaju najviše 20 A, odnosno imaju snagu do nekih 10 kW. Drukčije je ako za zaštitno

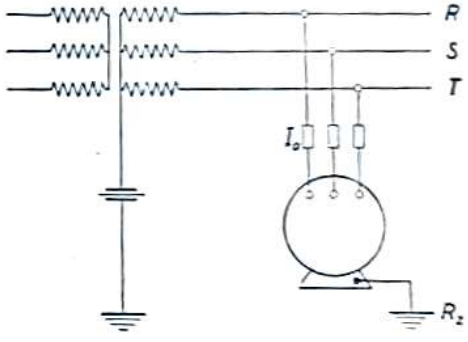
uzemljenje imamo na raspolaganju vodovodnu mrežu vrlo malog prelaznog otpora, ponekad čak manjeg od 1 Ω. U tim slučajevima možemo zaštitno uzemljenje upotrebiti i za veća trošila, iako nije preporučljivo ići do krajnje dozvoljene granice.

U praksi se zaštitno uzemljenje izvodi tako, da povežemo međusobno sve metalne dijelove, koji bi mogli doći pod napon u slučaju kvara na izolaciji, to jest kućišta električnih motora, metalna kućišta polužnih prekidača, aparata i drugo. Za uređaje, koji su blizu jedan drugome, izrađujemo zajedničko uzemljenje. Pojedini uzemljeni predmeti moraju biti paralelno priključeni na vod za uzemljenje, kako je prikazano na sl. 32. Tako imamo sva trošila i aparate priključene na vod za uzemljenje.

Nikada ne smijemo pojedina kućišta priključivati serijski, na primjer prema sl. 33. Razumije se, da zaštitno uzemljenje moramo dimenzionirati prema najvećem trošilu, koje je priključeno na zajedničko uzemljenje.

b) Zaštitno uzemljenje u mrežama s izoliranim zvjezdištem

Zaštitno uzemljenje u mrežama s izoliranim zvjezdištem mogli bismo izvesti u osnovi sasvim na isti način kao u mrežama s neposredno uzemljenim zvjezdištem. To je prikazano na sl. 34., prema kojoj je zvjezdište, u smislu ranijih izlaganja, povezano sa zemljom

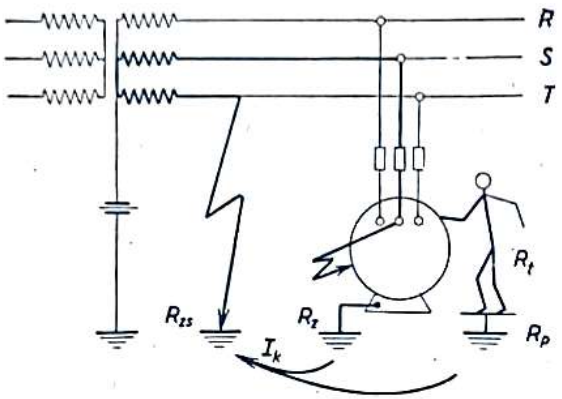


Slika 34. Zaštitno uzemljenje u mrežama s izoliranim zvjezdištem

preko probojnog osigurača. Prelazni otpor zaštitnog uzemljenja je R_z. U normalnom pogonu izolacija svih faza prema zemlji dovoljno je velika i zaštita uopće ne bi bila potrebna. Veća struja kvara može teći samo onda, kad već imamo u mreži zemljospoj jedne faze, a kod trošila nastane kvar na izolaciji i dodir s kućištem na drugoj fazi (vidi sl. 15). Ta struja kvara teče i kroz zaštitno uze-

mljenje. Prema našem zahtjevu zaštitno uzemljenje dimenzioniramo tako, da dodirni napon ni u jednom slučaju ne bude veći od 50 V.

Ako imamo, dakle, prema sl. 35, negdje u mreži zemljospoj, a dodirnemo se uzemljenog trošila koje ima kvar na izolaciji na drugoj fazi, teći će struja kvara I_k paralelno kroz zaštitno uzemljenje i kroz čovjeka s otporom R_t, zatim kroz zemljospoj s prelaznim otporom R_{zs}. Pri tome možemo ispustiti otpor vodova i u najnepo-



Slika 35. Struja kvara kod dodira uzemljenog trošila u mreži s izoliranim zvjezdištem kod zemljospoja u jednoj fazi i kvara na izolaciji trošila u drugoj fazi

voljnijem slučaju prelazni otpor između čovjeka i zemlje R_p. Ukupni otpor u strujnom krugu kvara je

$$R \simeq \frac{R_t \cdot R_z}{R_t + R_z} + R_{zs} \simeq R_z + R_{zs},$$

jer otpor zaštitnog uzemljenja možemo također zanemariti, budući da je prema otporu čovječjeg tijela neznatan.

Struja kvara je, prema tome

$$I_k = \frac{U}{R_z + R_{zs}},$$

a dodirni napon

$$U_d = I_k \cdot \frac{R_t \cdot R_z}{R_t + R_z} \simeq U \cdot \frac{R_z}{R_z + R_{zs}}.$$

Kad ne bismo imali zaštitnog uzemljenja, tekla bi struja kvara u najnepovoljnijem slučaju

$$I_k = \frac{U}{R_t + R_{zs}},$$

a dodirni napon bio bi

$$U_d' = I_k' \cdot R_t = U \frac{R_t}{R_t + R_{zs}},$$

gdje opet možemo izostaviti otpor zemljospoja, jer je neznatan u odnosu na otpor čovječjeg tijela.

Pomoću zaštitnog uzemljenja smanjili smo, dakle, dodirni napon prema razmjeru

$$\delta = \frac{U_d}{U_d'} = \frac{R_z \cdot (R_t + R_{zs})}{(R_z + R_{zs}) \cdot R_t} \cong \frac{R_z}{R_z + R_{zs}},$$

jer i ovdje možemo zanemariti razmjerno mali otpor R_{zs} zemljospoja, prema mnogo većem otporu čovječjeg tijela.

Taj obrazac sličan je onome na str. 40, kojim smo odredili smanjenje dodirnog napona pomoću zaštitnog uzemljenja u mrežama s uzemljenim zvjezdištem, s tom razlikom, da u ovom obrascu imamo prelazni otpor R_{zs} zemljospoja umjesto prelaznog otpora R_{pz} pogonskog uzemljenja u prijašnjem obrascu. Tamo smo vidjeli da se dodirni napon sa zaštitnim uzemljenjem ne smanjuje u naročitoj mjeri.

U našem slučaju prelazni otpor R_{zs} zemljospoja u većini je slučajeva veći od prelaznog otpora R_z zaštitnog uzemljenja i dodirni napon smanjujemo približno na jednu trećinu do jednu petinu pomoću zaštitnog uzemljenja. Moramo međutim voditi računa o tome, da smo tamo snizili od faznog napona mreže, a u ovom slučaju od linijskog napona mreže. Prema tome stvarno sniženje dodirnog napona ni ovdje nije naročito veliko, kako bismo na prvi pogled mogli zaključiti. I pored toga pomoću zaštitnog uzemljenja u mrežama s izoliranim zvjezdištem postižemo znatno manji dodirni napon nego u mrežama s uzemljenim zvjezdištem. Zato je opravdan zahtjev, da zaštitno uzemljenje moramo dimenzionirati prema našem prvom strožem obrascu. U mrežama s izoliranim zvjezdištem možemo postići potpunu sigurnost od električnih nesreća na taj način, ako zaštitno uzemljenje dimenzioniramo prema obrascu

$$R_z \leq \frac{50}{I_o},$$

gdje je I_o struja kod koje će osigurač isklopiti u slučaju kvara na izolaciji. Ako teče struja kvara manja od struje I_o osigurača, ne

može nastati opasni dodirni napon veći od 50 V, ako pak teče veća struja kvara, osigurač mora isklopiti.

Ovdje imamo na prvi pogled iste poteškoće kao u mrežama s uzemljenim zvjezdištem. Pojedinačno uzemljenje pojedinih trošila kod viših napona razvodnih mreža opet je upotrebljivo samo za manja trošila. To nam potvrđuju i slijedeća razmatranja. Pogledat ćemo, naime, kakav zapravo utjecaj ima pogonski napon.

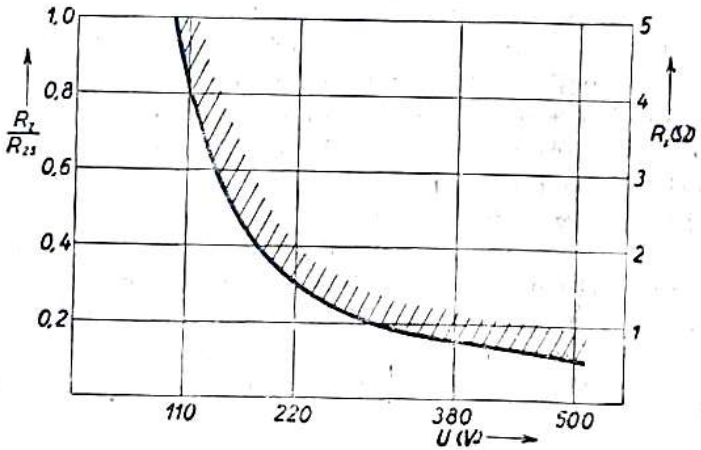
Dodirni napon kod uzemljenog trošila ne smije prekoračiti granicu koja je opasna. Zato mora biti

$$50 \geqq U_d = U \cdot \frac{R_z}{R_z + R_{zs}}.$$

Iz te jednadžbe možemo izračunati najveći dozvoljeni prelazni otpor zaštitnog uzemljenja kod datog napona i datog prelaznog otpora zemljospoja

$$R_z \leqq \frac{50 \cdot R_{zs}}{U - 50}.$$

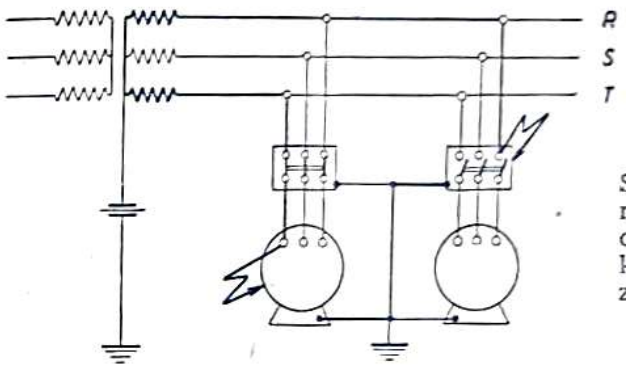
Što je, dakle, veći pogonski napon, tim manji mora biti razmjer između prelaznog otpora zaštitnog uzemljenja i zemljospoja ($R_z : R_{zs}$). To je vidljivo na sl. 36. Budući da obično moramo računati s najmanjim prelaznim otporom zemljospoja $R_{zs} = 5\ \Omega$, u dija-



Slika 36. Dozvoljeni najveći razmjer prelaznog otpora R_z zaštitnog uzemljenja i prelaznog otpora R_{zs} zemljospoja (lijeva skala), odnosno najveći dozvoljeni prelazni otpor R_z zaštitnog uzemljenja kod prelaznog otpora zemljospoja $R_{zs} = 5\ \Omega$ (desna skala), u ovisnosti o naponu mreže

gramu na sl. 36, na desnoj strani, nacrtana je još i posebna skala, koja pokazuje najveće dozvoljene prelazne otpore R_z zaštitnog uzemljenja za odgovarajući slučaj.

Iz tog dijagrama slijedi da možemo postići kod prelaznog otpora zaštitnog uzemljenja 2 Ω i kod pogonskog napona 110 V u svakom slučaju dovoljnu zaštitu, jer dodirni napon ne može dobiti veću vrijednost od 50 V. Kod viših napona potpunu zaštitu ne možemo uvijek postići navedenim prelaznim otporom zaštitnog uzemljenja. Kod napona 220 V dobit ćemo dodirni napon 50 V, ako je prelazni otpor zemljospoja 6,8 Ω. Kod napona 380 i 500 V ne možemo postići željenu zaštitu samo zaštitnim uzemljenjem, jer bi prelazni otpor zaštitnog uzemljenja morao biti tako malen, da ga praktički ne bismo mogli ostvariti. Tada će naš prijašnji obrazac dobiti punu važnost. S osiguračem moramo ograničiti jačinu struje kvara, a tim i veličinu dodirnog napona.



Slika 37. Dvostruki zemljospoj (kvar na izolaciji) u različitim fazama kod međusobno povezanih vodova za uzemljenje

Tako, dakle, vidimo, da pojedinačnim uzemljivanjem pojedinih trošila ne možemo postići dovoljnu zaštitu kod viših napona i da nam struja iskapčanja osigurača ograničuje primjenu pojedinačnog uzemljenja na manja trošila. Možemo pomoći sebi na jednostavan način, moguć samo kod razvodnog sistema s izoliranim zvjezdištem.

Opet povežemo međusobno sva uzemljena kućišta svih trošila. Kod ispravnog pogona, razumije se, struja kvara uopće ne teče. Ako pak nastane kvar na izolaciji, na primjer na lijevom motoru na sl. 37. u jednoj fazi, dobit ćemo ustvari zemljospoj jedne faze. Struja kvara još ne može teći i dodir kućišta nije opasan. Kontrolni uređaj zemljospoja mora nam pokazati zemljospoj. Treba ga potražiti i otkloniti.

Kvar na izolaciji može nastati još i na nekom drugom mjestu u mreži, prije nego što smo otklonili zemljospoj. Ako je kvar na-

stao u istoj fazi, opet ne će teći struja kvara i u biti se nije ništa promijenilo. Imamo dvostruki zemljospoj u jednoj istoj fazi. Ako pak nastupi drugi kvar u drugoj fazi, na primjer prema sl. 37. na prekidaču desnog motora, teći će struja kvara pod djelovanjem linijskog napona u zatvorenom strujnom krugu, koji je na slici označen debljim linijama. Odmah vidimo, da struja kvara uopće ne teče preko zaštitnog uzemljenja. Zbog toga ni u ovom slučaju nije neophodno potrebno da zaštitno uzemljenje ima mali prelazni otpor.

U ovom slučaju teče struja kvara kroz strujni krug, zatvoren metalnim vodičima i dijelovima. Jačina struje kvara zavisit će o ukupnom otporu vodova R_v u tom zatvorenom strujnom krugu

$$I_k = \frac{U}{R_v}.$$

U kraćim mrežama uvijek možemo očekivati da će struja kvara biti toliko velika, da će osigurači sigurno iskopčati, jer to je ustvari kratki spoj. Moramo zahtijevati za svako pojedino trošilo da iskopča svoj osigurač, u slučaju da kroz njega teče struja kvara. Mora da bude ispunjen uslov, da je

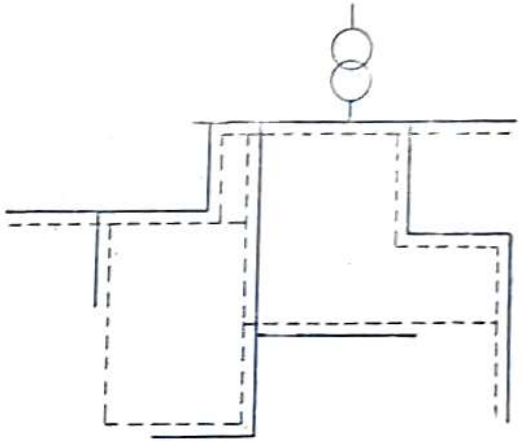
$$I_o < \frac{U}{R_v},$$

ako s I_o označimo struju iskapčanja osigurača.

Pitanje je, da li bismo morali biti još strožiji? Moramo li zahtijevati da osigurač iskopča i u slučajevima, kad kvar na izolaciji ne nastupi na stezaljkama kod punog napona, nego u namotaju u blizini zvjezdišta trošila? To je, bez sumnje, poželjno i korisno, jer nas upozorava na kvar, ali obzirom na sigurnost od električnih nesreća moramo zahtijevati samo to, da na kućištima zaštićenih trošila ne dođe do nedozvoljeno velikog dodirnog napona.

Ako osigurači ne iskopčaju, teći će u gore označenom strujnom krugu struja, koja se troši u otporu svih vodova. Tu možemo očekivati da će najveći pad napona biti u faznim vodičima, kroz koje protječe struja kvara. Ako su trošila, kod kojih je došlo do kvara na izolaciji, blizu jedan drugome, teći će struja kvara kroz vrlo kratki dio zaštitnog vodiča, koji međusobno povezuje pojedina kućišta. Pad napona bit će u tom vodiču malen, a u faznim vodičima velik. Zato će zaštitni vodič i kućišta, koja su na njega priključena, imati po cijeloj dužini zaštitnog vodiča približno potencijal zemlje, kao i zaštitno uzemljenje. I u slučaju da osigurači ne isključe, kućišta zaštićenih trošila ne će dobiti opasne napone prema zemlji.

Nešto drukčiju sliku dobit ćemo gdje imamo više razvedenu mrežu, ako dođe do zemljospoja na udaljenim dijelovima mreže. U tom slučaju struja kvara mora teći dugim putem kroz zaštitni vodič i na njega može otpasti znatan dio ukupnog napona. Možemo dobiti i nedozvoljeno velike dodirne napone. To ne smijemo dozvoliti. Možemo, međutim, to spriječiti na taj način, što ćemo zaštitne vodiče pojedinih odvojaka međusobno spojiti i tako stvoriti zatvorene zamke, na primjer, prema sl. 38.



Slika 38. Međusobno povezivanje zaštitnih vodiča (— — —) u mreži (—)

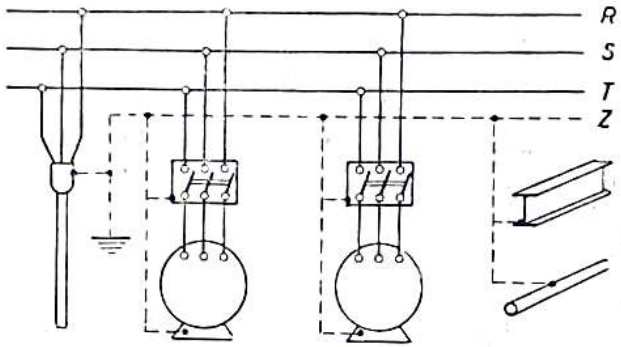
Struja kvara ima u tom slučaju više sporednih putova na raspolaganju po međusobno povezanim zaštitnim vodičima. Ako je ukupni otpor sporednih ogranaka mreže dovoljno malen prema otporu vodova kroz koje protječe struja kvara, zaštitni vodič ne će nigdje dobiti opasni napon prema zemlji.

Najveću sigurnost postižemo tako, da dosljedno međusobno povežemo ne samo sve metalne omotače i sve metalne dijelove električnih uređaja, kao kabelske omotače, kućišta razvodnih uređaja, aparata i t. d., nego i vodljive dijelove metalnih konstrukcija, koje se nalaze u blizini, kao cijevi vodovoda, centralnog grijanja, željezne konstrukcijske dijelove zgrade i t. d., kako je shematski prikazano na sl. 39.

U tom slučaju zemljospoj uopće ne može nastati na taj način, da bi struja mogla teći kroz zemlju, nego mora teći uvijek kroz metalne dijelove i to najviše kroz međusobno paralelno povezane zaštitne vodiče Z i kroz metalne dijelove, koji su s njima povezani. Zaštitni vodič moramo uzemljiti bar na jednom mjestu, da mu damo potencijal zemlje. Budući da kroz uzemljenje struja ne teče, ono može imati razmjerno velik prelazni otpor. Ako imamo kon-

trolni uređaj za zemljospoj, dovoljan je prelazni otpor zaštitnog uzemljenja 20 Ω. Toliki prelazni otpor možemo često postići već povezivanjem zaštitnog voda s cijevima vodovoda ili drugim metalnim konstrukcijskim dijelovima, koji su dobro uzemljeni.

Ako međusobno povezivanje svih metalnih dijelova sa zaštitnim vodičem ne izvedemo dosljedno, može nastati puni zemljospoj i struja kvara teći u strujnom krugu preko zaštitnog uzemljenja i mjesta zemljospoja. To ne smijemo dozvoliti. U tom slučaju bi na nedovoljno dimenzionirano zaštitno uzemljenje otpao najveći dio ukupnog napona i dodirni napon bi bio nedozvoljeno velik. Zato moramo povezati sa zaštitnim vodičem sve dohvatljive metalne dijelove uređaja, iako u normalnom pogonu nisu pod naponom.

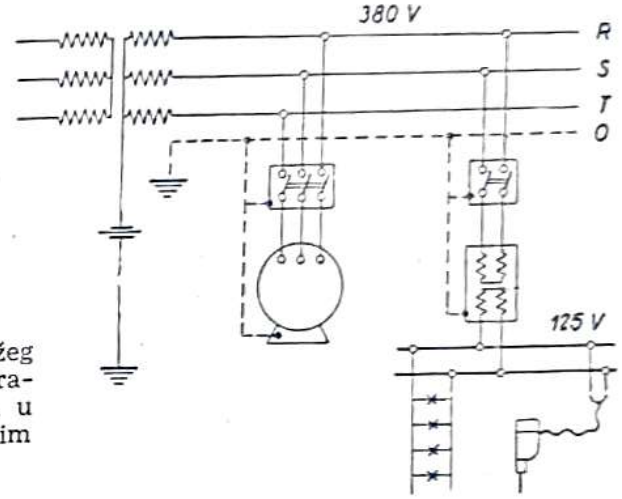


Slika 39. Zaštitni vodič uzemljen na jednom mjestu, a na njega su priključena sva kućišta i svi dohvatljivi metalni dijelovi

Posebno treba naglasiti, da je taj način zaštite moguć samo u mrežama s izoliranim zvjezdištem. Samo tada je dovoljno uzemljenje zaštitnog vodiča s razmjerno velikim prelaznim otporom. Ako, međutim, imamo mrežu s uzemljenim zvjezdištem, mora već kod prvog kvara na izolaciji poteći kroz zaštitno uzemljenje pojedinih trošila struja kvara pune jačine. Zato moramo u tom slučaju zaštitno uzemljenje dimenzionirati prema zahtjevima, koje smo ranije naveli.

Tako ima trofazni razvodni sistem s izoliranim zvjezdištem veliku prednost. Pomoću njega možemo postići najveću moguću sigurnost. Upotrebljavamo ga u manje razgranatim, a jako opterećenim mrežama s trošilima velike snage, kod kojih pojedinačno zaštitno uzemljenje nije izvodljivo. Prema tome, dakle, ovaj razvodni sistem zgodan je za upotrebu u tvornicama i rudnicima, jer

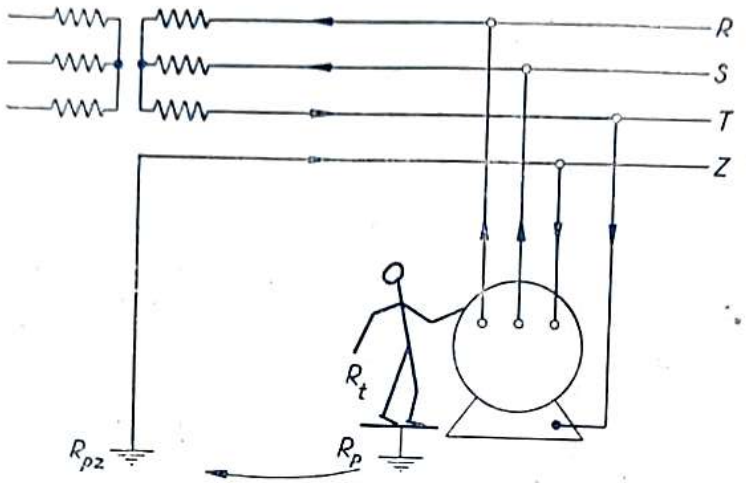
je u njima opasnost od električnih nesreća vrlo velika. Nedostatak toga sistema je u tome, da kod uobičajenog napona 380 V ne možemo na njega priključiti jednofazna trošila na fazne napone. Kada, dakle, imamo jednofazna trošila, moramo za njih transformirati napon, na primjer od linijskog 380 V na niži napon 220 V ili 125 V. To radimo naročito u rudnicima, u kojima imamo pretežno trofazni razvodni sistem mreže s izoliranim zvjezdištem, napona 380 V. Na takvu mrežu priključujemo, prema sl. 40., preko posebnih transformatora na 220 V ili u većini slučajeva 125 V jednofazna trošila, kao što su rasvjeta i ručni električni alat. Možemo ustvrditi, da je sigurnost od nesreća kod takvog razvodnog sistema, čak kod napona 500 V, veće nego kod napona 380/220 V s uzemljenim zvjezdištem.



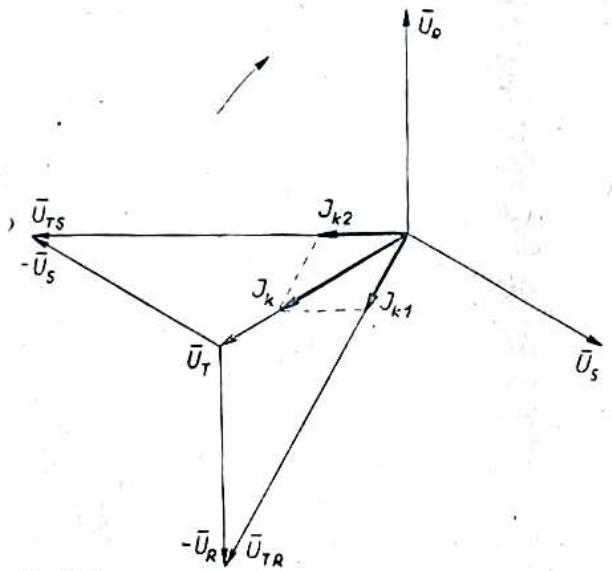
Slika 40. Upotreba nižeg napona za priključak rasvjete i ručnog alata u mrežama s izoliranim zvjezdištem

Radi većeg područja razvodnog sistema i veće sigurnosti od električnih nesreća u tvornicama, ponekad dajemo prednost razvodnom sistemu 500 V s izoliranim zvjezdištem. Međutim, potrebno je da imamo uređaj za kontrolu zemljospoja i da dosljedno izvedemo uzemljenje i pouzdano međusobno povezivanje svih metalnih dijelova električnih uređaja i drugih metalnih dijelova u neposrednoj blizini. Zaštitni vodič mora uvijek biti, kao i kod svih drugih načina zaštite takav, da ga lako razlikujemo na svakom mjestu instalacije. Kod vodova s više vodiča, treba da ima posebnu boju izolacije, prema našim propisima crvenu, a ako je u cijevima, mora imati ili drukčiju izolaciju ili izolaciju druge boje. Moramo paziti da ga ne zamijenimo s faznim vodičem, jer bi to bilo opasno. Takve zamjene već su prouzrokovale i smrtne nesreće. Pogledajmo kuda teče struja kvara u tom slučaju.

Prema sl. 41. zamijenjeni su priključci faznog vodiča T i zaštitnog vodiča Z. Strelice pokazuju smjer zatvorenog kruga struje kvara, kod čega moramo opet imati na umu da se radi o izmjeničnoj struji, koja naizmjence teče u oba pravca. Najljepše nam prikazuje nastalo stanje vektorski dijagram na sl. 42. Posmatrajmo



Slika 41. Zamjena priključka faznog vodiča T i zaštitnog vodiča Z



Slika 42. Vektorski dijagram za slučaj zamjene faznog i zaštitnog vodiča

struju kvara jedne faze, na primjer, faze T! Struja kvara teče pod djelovanjem dva linijska napona, odnosno linijskog napona između faze T i faze R s jedne strane, i linijskog napona između faze T i faze S s druge strane. Zbog toga će struja kvara imati dvije komponente. Prva komponenta I_{k1} teče pod djelovanjem linijskog napona U_{TR}, druga komponenta I_{k2} struje kvara teći će pod djelovanjem linijskog napona U_{TS}. Svaka od tih komponenata struje kvara u fazi je sa svojim djelujućim naponom, jer možemo zanemariti induktivni otpor vodova, koji je vrlo malen prema otporu R_t čovjeka i eventualnog prelaznog otpora R_p između čovjeka i zemlje. Svaka od tih komponenata struje kvara ima jačinu

$$I_{k1} = I_{k2} = \frac{U}{R_t + R_p + R_z} \approx \frac{U}{R_t + R_p},$$

te će struja kroz čovječje tijelo, prema tome, biti

$$I_k = \frac{\sqrt{3}\,U}{R_t + R_p + R_z} \approx \frac{\sqrt{3}\,U}{R_t + R_p}.$$

Prema tome je 3 puta veća nego odgovarajuća struja kvara u slučaju, kad dođemo u dodir neposredno ili preko kućišta trošila s jednom fazom u mreži s uzemljenim zvjezdištem, odnosno $\sqrt{3}$-puta veća nego struja kvara kad dođemo u dodir s jednom fazom razvodne mreže s izoliranim zvjezdištem, koja ima zemljospoj u drugoj fazi.

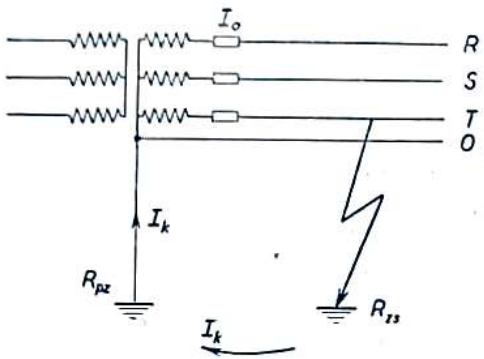
Razumije se, da je trošilo u takvom slučaju ponekad i neposredno ili prirodno uzemljeno, ili u vezi sa zemljom, na primjer pogonski motor pumpe. No i u tim je slučajevima struja kvara, koja protječe kroz čovjeka, dovoljno velika, a većinom i smrtonosna.

c) Dimenzioniranje pogonskog uzemljenja kod uređaja niskog napona

Prije smo vidjeli, da prelazni otpor pogonskog uzemljenja utječe na veličinu struje kvara, a također i na dimenzioniranje zaštitnog uzemljenja. Zato moramo odrediti po kojim smjernicama treba dimenzionirati pogonsko uzemljenje u mrežama s uzemljenim zvjezdištem.

Pogonsko uzemljenje dimenzioniramo s dvije točke gledišta. Prema prvoj, odlučujući je zemljospoj same mreže. Ako, naime,

zemljospoj dobije jedan između faznih vodiča, prema sl. 43., vodič će na tom mjestu dobiti potencijal zemlje, te će pod djelovanjem faznog napona odgovarajuće faze teći struja kvara I_k preko prelaznog otpora R_{zs} zemljospoja i preko pogonskog uzemljenja R_{pz}. Tada će neutralni vodič na početku dobiti napon prema zemlji zbog pada napona u prelaznom otporu pogonskog uzemljenja. Neutralni vodič, međutim, ne smije dobiti napon prema zemlji, jer smo navikli da uvijek ima potencijal zemlje, pa ga zbog toga u instalacijama polažemo na taj način, da je samo malo izoliran i da se zbog



Slika 43. Dimenzioniranje pogonskog uzemljenja s obzirom na zemljospoj u mreži niskog napona

toga prema propisima i ne smatra izoliranim vodičem. Možemo dozvoliti samo toliki napon neutralnog vodiča prema zemlji, da nam nije opasan, to jest, prema prijašnjim izlaganjima najviše 50 V. Struja kvara ima tada najveću jačinu

$$I_k = \frac{U_f}{R_{pz} + R_{zs}},$$

jer ne smijemo računati s otporom oštećenoga vodiča, budući da kvar može nastati i na samom njegovom početku. Neutralni vodič dobit će, dakle, u zvjezdištu napon prema zemlji, koji je dat sa

$$U_o = I_k \cdot R_{pz}.$$

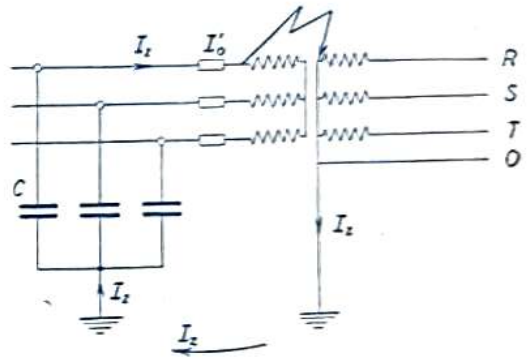
Struja kvara I_k ne smije prekoračiti jačinu I_o, kod koje će pregorjeti osigurač, koji osigurava vodič ili trošilo na kojima je nastao kvar s tim, da napon neutralnog vodiča prema zemlji ne bude veći od 50 V. Zato mora biti

$$50 > I_o \cdot R_{pz},$$

odnosno, pogonsko uzemljenje mora imati prelazni otpor, koji ne smije biti veći od

$$R_{pz} < \frac{50}{I_o}.$$

Pitanje je, kolika još mora biti struja I_o osigurača za naš obrazac. Teško bi to mogla da bude struja iskapčanja osigurača, koji osigurava vodič u transformatorskoj stanici, jer bi za to bili potrebni vrlo mali prelazni otpori pogonskog uzemljenja, koje ne bismo mogli ostvariti kod običnih većih presjeka i odgovarajućih jačih osigurača. Osim toga ima spoj između faznih vodiča i zemlje na mreži u većini slučajeva znatno velik prelazni otpor, rijetko kada manji od 5 Ω.



Slika 44. Dimenzioniranje pogonskog uzemljenja s obzirom na spoj između visokog i niskog napona transformatora

Zato se možemo ograničiti na neposredne zemljospoje preko zaštitnih uzemljivača kod trošila i za nas je odlučujuće najveće trošilo priključeno na našu mrežu. Zbog toga moramo uvrstiti u naš obrazac struju iskapčanja I_o osigurača, koji osigurava to najveće trošilo u mreži, koje je zaštićeno zaštitnim uzemljenjem.

Druga točka gledišta dolazi u obzir kod mreža, koje su preko transformatora priključene na visokonaponski vod. Tu moramo pogonsko uzemljenje niskonaponske mreže dimenzionirati s obzirom na struju zemljospoja visokonaponske mreže, koja bi tekla kod kvara, to jest, kod spoja između visokog i niskog napona u transformatoru ili transformatorskoj stanici preko pogonskog uzemljenja niskonaponske mreže, kako je prikazano na sl. 44., na kojoj su kapaciteti C visokonaponskih vodiča nacrtani koncentrirano za pojedine faze.

Ta struja zemljospoja je, naime, kapacitivna struja, jer može teći samo preko kapacitivnih otpora visokonaponskih vodiča prema

zemlji, ukoliko u izuzetnim slučajevima neutralna točka visokonaponske mreže nije neposredno uzemljena. Kod vrlo dugih visokonaponskih vodova ta je struja zemljospoja dosta velika, a isto tako i kod kabelskih vodiča. Njena približna jačina može se izračunati empiričkim izrazom

$$I_z = k \cdot U \cdot l,$$

gdje je U napon visokonaponskog voda u kV, l njegova dužina u km, a k faktor ovisan o samoj mreži; on ima kod zračnih vodova bez vodiča za uzemljenje vrijednost približno $k \cong 0{,}0025$, a kod kabela $k \cong 0{,}05$ do $0{,}1$. Budući da velika struja zemljospoja proizrokuje razne neugodnosti često je smanjujemo posebnim uređajima za kompenziranje, kao što je, na primjer, Petersenova prigušnica.

U slučaju spoja između namotaja visokog i niskog napona, teče struja zemljospoja preko niskonaponskog zvjezdišta i njegovog pogonskog uzemljenja, i zbog toga neutralni vodič može opet dobiti napon prema zemlji, kao i u prijašnjem slučaju. Taj napon moramo opet ograničiti i prelazni otpor pogonskog uzemljenja ne smije biti veći od

$$R_{pz} < \frac{50}{I_z},$$

gdje je I_z prirodna, odnosno kompenzacijom smanjena struja zemljospoja.

Kada pak imamo na visokonaponskoj strani osigurače ili automatske prekidače za preveliku struju, čija je struja iskapčanja manja od jačine struje zemljospoja ($I_o' < I_z$), možemo u naš gornji obrazac uvrstiti tu struju iskapčanja osigurača.

Propisi nekih država dozvoljavaju za slučaj spoja između namotaja visokog i niskog napona, da neutralni vodič dobije prema zemlji veći napon do 125 V. To je vrlo rijedak kvar, pa bismo prema prijašnjem obrazcu dobili kod mreža, priključenih na razgranate visokonaponske mreže, vrlo male prelazne otpore niskonaponskog pogonskog uzemljenja, vrlo teško ostvarljive. S toga stanovišta dovoljan je prelazni otpor pogonskog uzemljenja niskonaponske mreže veličine

$$R_{pz} \leqq \frac{125}{I_z} \quad \text{kod } I_z < I_o',$$

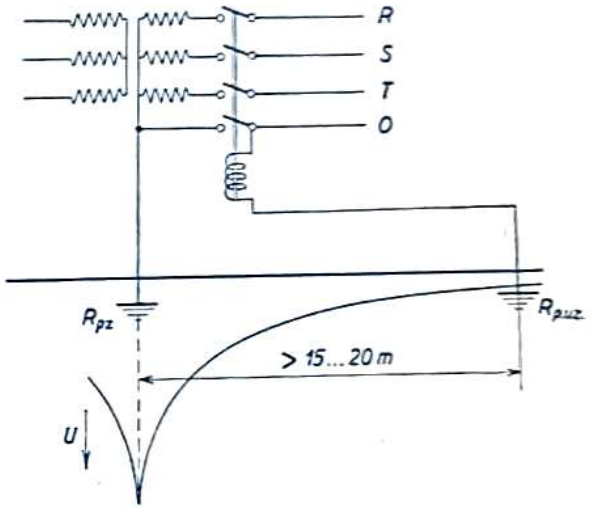
odnosno

$$R_{pz} \leqq \frac{125}{I_o'} \quad \text{kod } I_z > I_o'.$$

Razumije se da pogonsko uzemljenje moramo dimenzionirati obzirom na napon, što ga dobija nulti vod u prvom slučaju kod zemljospoja jednog od faznih vodiča, i u drugom slučaju pri dodiru između namotaja visokog i niskog napona.

Prelazni otpor pogonskog uzemljenja mora, dakle, biti manji, odnosno najviše jednak manjem otporu, koga dobijemo iz navedenih obrazaca, s obzirom na oba stanovišta za dimenzioniranje pogonskog uzemljenja.

Na taj način dimenzioniramo pogonsko uzemljenje u mrežama s uzemljenim zvjezdištem, a isto tako i u mrežama s izoliranim zvijezdištem. U posljednjem slučaju pogonsko je uzemljenje vezano sa zvijezdištem preko probojnog osigurača. U slučaju kvara, kad niski napon dobije spoj s visokim naponom, probije visoki napon probojni osigurač i na taj se način zvijezdište neposredno uzemlji. Tada imamo posve jednake prilike kao i kod neposredno uzemljenog zvjezdišta.



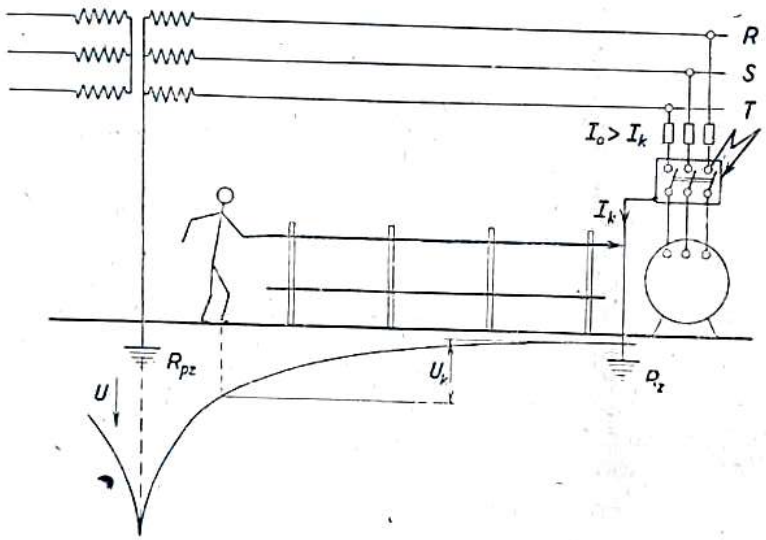
Slika 45. Spoj staničnog zaštitnog automata

Ponekad će biti vrlo teško ispuniti postavljene zahtjeve. Naši obrazci zahtijevali bi tako male prelazne otpore pogonskog uzemljenja, da ih praktički ne bismo mogli postići. Tada imamo još mogućnost isključenja uređaja u slučaju da neutralni vodič dobije preveliki napon prema zemlji. Za tu svrhu upotrebljavamo odgovarajuće okidače ili releje, koji su pod djelovanjem napona zvjezdišta prema zemlji, te oni izbace prekidač uredaja, ako pomenuti napon poraste preko dozvoljene granice.

Takav zaštitni automat prikazuje sl. 45. Okidač mora izbaciti automat, kad neutralni vodič dobije nedozvoljeno visoki napon prema zemlji.

U tom slučaju struja kvara teče kroz pogonsko uzemljenje i kod njega imamo naponski lijevak, na slici posebno nacrtan. Pomoćno uzemljenje $R_{p.uz.}$ staničnog zaštitnog automata mora biti izvan naponskog lijevka. Zato ga moramo postaviti na udaljenost od 15 do 20 metara od pogonskog uzemljenja R_{pz}.

Umjesto naponskog okidanja mogli bismo isto tako upotrebiti strujno okidanje s okidačem ili relejom, koji iskapča pod djelovanjem struje u vodiču za uzemljenje između zvijezdišta i pogonskog uzemljenja. Međutim, strujna okidanja ipak ne upotrebljavamo, jer bi time uključili u vod za uzemljenje dodatni otpor. Želimo uvijek imati vod za uzemljenje po mogućnosti kratak, malog otpora.



Slika 46. Slabo pogonsko uzemljenje je opasno

Vrlo je važno da pogonsko uzemljenje zaista ima potreban mali prelazni otpor i zato ga moramo pažljivo izvesti, te više puta kontrolirati. Preveliki prelazni otpor pogonskog uzemljenja može imati najteže posljedice.

Kod dimenzioniranja zaštitnog uzemljenja računali smo s time, da pogonsko uzemljenje ima manji prelazni otpor nego zaštitno uzemljenje. Ako pak imamo pogonsko uzemljenje s prevelikim

prelaznim otporom, teći će manja struja kvara i lako se može dogoditi, da je struja kvara manja od struje iskapčanja osigurača. Tada osigurač ne može isključiti u slučaju kvara i struja kvara teče trajno. To može prouzrokovati nedozvoljeno velike dodirne napone i napone između raznih metalnih dijelova, koji su neposredno ili preko zemlje u vezi s ovim ili onim uzemljenjem, odnosno vodom za uzemljenje. Zbog toga mogu nastupiti nezgode ili nesreće čak i na mjestima, gdje ih uopće ne bismo mogli očekivati.

Takav jedan mogući slučaj prikazuje sl. 46. Pogonsko uzemljenje R_{pz} neka ima toliki prelazni otpor, da osigurač ne pregori kod struje izbacivanja I_o trošila s kvarom.

Stalno teče struja kvara I_k, koja kod pogonskog uzemljenja prouzrokuje R_{pz} naponski lijevak. Željezna žica drvene ograde neka slučajno ima spoj s vodom za uzemljenje zaštitnog uzemljenja. Između zemlje i žice imamo u blizini pogonskog uzemljenja napon U_k, koji može biti i smrtonosan.

č) Zaštitno uzemljenje kod uređaja visokog napona

Kod visokih napona moramo također zaštitno uzemljenje dimenzionirati kao zaštitnu mjeru. Osim toga, istovremeno se koristimo u stanovitoj mjeri i izolacijom, naime izoliranjem mjesta za posluživanje prema zemlji.

Kod visokog napona zvjezdište u većini slučajeva nije uzemljeno, ukoliko uopće nemamo spoj u trokutu. Opasnost nam prijeti od kvarova na izolaciji, to jest kod zemljospoja jedne faze. Tada teče u zemlju preko jednog mjesta kvara struja zemljospoja, zatvorena preko kapacitivnih otpora ostalih dviju faza prema zemlji. Ta ista struja teče i kroz naše tijelo, ako zbog neopreznosti dodirnemo koju fazu visokog napona ili dođemo s njom u vezu preko metalnih konstrukcija.

Kod visokog napona možemo isto tako upotrebiti zaštitno uzemljenje, kako smo prije dimenzionirali pogonsko uzemljenje niskonaponskih uređaja, s obzirom na spoj visokog i niskog napona u transformatorskoj stanici. Prelazni otpor zaštitnog uzemljenja R_{zv} u uređajima visokog napona mora biti, dakle,

$$R_{zv} = \frac{125}{I_z},$$

gdje je I_z prirodna ili kompenzacijom smanjena struja zemljospoja čitave visokonaponske mreže. Tu struju zemljospoja određujemo pomoću ranije navedenih obrazaca.

Prema ovom obrazcu dozvoljavamo, dakle, dodirni napon 125 V. Taj napon je opasan. Moramo računati s tim, da je dodirni napon u većini slučajeva manji od napona kvara, jer služi, kao što znamo, kod visokonaponskih uređaja i uzemljenja kao dodatna zaštita. Na taj način možemo opravdati taj dodirni napon, iako nije dozvoljeno visok. U pogonima, koji su naročito opasni, snižavamo po mogućnosti dodirni napon na 50 V.

Do zemljospoja može lako doći i za vrijeme pogona. Imamo kontrolni uređaj, koji nam odmah javlja zemljospoj. Kod visokog napona moramo pristupiti iskapčanju uređaja sa zemljospojem, ako to pogon dopušta. Drugi zemljospoj u drugoj fazi prouzrokuje, naime, kratki spoj, koji odmah iskopča uređaj.

U načelu moramo uzemljiti sve metalne dijelove, koji se nalaze u blizini strujnih krugova visokog napona, a mogu doći pod napon u slučaju kvarova na izolaciji ili zbog indukcije. Razni metalni dijelovi mogu lako dobiti različiti visoki napon kvara prema zemlji. Da spriječimo napone između susjednih, a istovremeno dohvatljivih metalnih dijelova, moramo ih međusobno dobro metalno povezati.

Uzemljiti moramo prije svega sve metalne dijelove električnih strojeva, transformatora, mjernih transformatora i drugih uređaja visokog napona, koji nisu pod naponom. Nadalje trebamo uzemljiti i sekundarni strujni krug mjernih transformatora, jer se lako može dogoditi u toku pogona da ti strujni krugovi dobiju viši potencijal prema zemlji. Isto tako moramo uzemljiti sve željezne i uopće sve metalne oklope razvodnih uređaja, metalne konstrukcije i nosače nosivih i provodnih izolatora, kabelske uvodnice i omotače kablova. Naročito moramo paziti na pravilno uzemljavanje svih onih metalnih dijelova, kojih se za vrijeme pogona možemo dohvatiti, kao što su, na primjer, ručke za posluživanje, zaštitne mreže visokonaponskih ćelija i t. d. Na električnim dalekovodima najčešće nastaju zemljospoji, ako imamo potporne izolatore. Ako se izolator razbije, žica pada na metalni nosač i na njemu leži. Tako dobijemo trajan zemljospoj. Kod dalekovoda s visećim izolatorima zemljospoji su mnogo rjeđi.

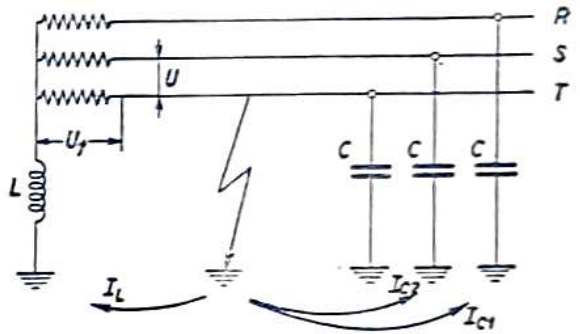
Prema navedenome, moramo stupove i nosače dalekovoda u nekim slučajevima uzemljiti, naime onda, kad je opasnost od nesreća veća. To naročito vrijedi za željezne stupove s potpornim izolatorima, koje moramo uvijek uzemljiti. Željezne stupove s visećim izolatoriskim lancem uzemljavamo samo u blizini putova i cesta.

Željezne nosače na drvenim stupovima uzemljavamo također u blizini cesta, inače ih ne uzemljavamo.

Dalekovodi imaju u većini slučajeva poseban vod za uzemljavanje, koji treba da ga štiti od atmosferskih prenapona, a istovremeno metalno povezuje pojedine stupove. Uzemljavamo svaki pojedini stup, ili prema mogućnostima uzemljavanja samo one, koje možemo lakše i jednostavnije uzemljiti.

Vodič za uzemljavanje od zaštitnih omotača do uzemljivača moramo dimenzionirati prema struji zemljospoja. U pogonima mora imati presjek barem 16 mm² kod bakrenih vodiča, odnosno 35 mm² kod željeznih vodiča, koji mora biti poolovljen ili pocinčan. Presjeci bakrenih vodiča veći od 50 mm², odnosno željeznih vodiča veći od 100 mm² nisu nikad potrebni. Vodič za uzemljenje mora biti vidljiv i osiguran od mehaničkih oštećenja.

Zaštitno uzemljenje kod visokih napona mora biti izvedeno vrlo pažljivo. Mora trajno imati potreban najmanji prelazni otpor, koji se može umanjiti, ako kompenziramo struju zemljospoja.

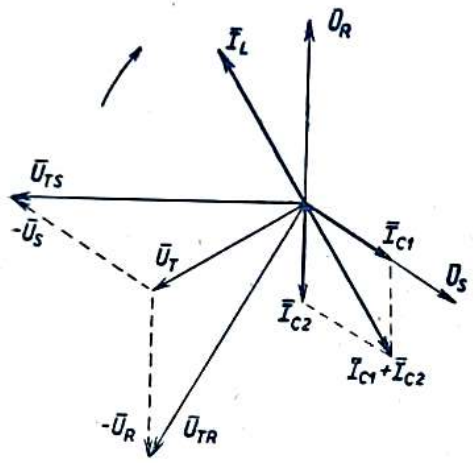


Slika 47. Zemljospoj u mreži visokog napona s prigušnicom uzemljenja

Za tu svrhu se upotrebljava Petersonova prigušnica. Pomoću nje može se postići da kroz mjesto zemljospoja praktično ne teče struja. To je naročito važno s obzirom na prekidajuće zemljospoje. Zbog atmosferskih prenapona ili putujućih prenaponskih valova može nastati strujni luk prema zemlji, koji se pali i gasi velikom brzinom. Kad se strujni luk prekine, nastaju prenaponi, koji ga ponovo upale. Pritom raste dužina strujnog luka i tako ponekad dobijemo kratki spoj među fazama. Ako pak ugradimo pomenutu prigušnicu za uzemljenje između zvjezdišta i zemlje u transformatorskoj stanici na početku dalekovoda, strujni luk zemljospoja se ne može razviti, odnosno, ne može se ponovo upaliti.

Djelovanje Petersonove prigušnice za uzemljenje najlakše ćemo razumjeti na osnovi sl. 47. i vektorskog dijagrama na sl. 48.

Prema sl. 47. Petersonova prigušnica uključena je između zvjezdišta izvora trofaznog sistema struje visokog napona i zemlje. Prema slici pretpostavljamo zemljospoj u fazi T. Pojedine faze imaju, razumije se, svoje kapacitete C prema zemlji. U slučaju zemljospoja, pod utjecajem linijskih napona, teče između faza T i R, odnosno T i S, kapacitivna struja I_{c1}, odnosno I_{c2}, a pored toga teče pod utjecajem faznog napona odgovarajuće faze, to jest u datom slučaju faze T, još i induktivna struja I_L u strujnom krugu kroz prigušnicu uzemljenja. Ako je prigušnica uzemljenja pravilno dimenzionirana prema kapacitivnim strujama zemljospoja, kroz mjesto zemljospoja uopće ne teče struja. To je vidljivo iz vektorskog dijagrama na sl. 48.



Slika 48. Vektorski dijagram djelovanja prigušnice uzemljenja

Imamo tri fazna napona $\bar{U}_R$, $\bar{U}_S$ i $\bar{U}_T$. Prikazat ćemo vektorski dijagram obzirom na mjesto zemljospoja, jer je tako najpregledniji. Između faze T, odnosno mjesta zemljospoja i faze R djeluje linijski napon

$$\bar{U}_{TR} = \bar{U}_T - \bar{U}_R,$$

a između faze T i faze S linijski napon

$$\bar{U}_{TS} = \bar{U}_T - \bar{U}_S.$$

Vektori tih dvaju linijskih napona nacrtani su u dijagramu. Ta dva napona prouzrokuju struju $\bar{I}_{c1}$, odnosno $\bar{I}_{c2}$ u strujnom krugu kroz zemljospoj i kapacitet C između neoštećenih faza i zemlje. Struje su, dakle, ustvari potpuno kapacitivne, koje pretječu odgovarajući napon za kut $\pi/2$. Fazni napon faze T, koja ima zemljospoj, tjera struju u strujnom krugu zemljospoja i induktivnog otpora prigušnice uzemljenja, koja ima induktivitet L. Ta struja I_L mora zaostajati za faznim naponom $\bar{U}_T$ za kut $\pi/2$. Vektorski dijagram za smjer struja, kako smo ih prikazali na sl. 48., odgovara stvarnosti. Kod pune kompenzacije mora biti zbir svih struja, koje teku kroz mjesto zemljospoja, jednak nuli, to jest

$$\bar{I}_{C1} + \bar{I}_{C2} + \bar{I}_L = 0.$$

Tako je prikazano na vektorskom dijagramu, da možemo teoretski struju zemljospoja potpuno kompenzirati, ako je prigušnica uzemljenja pravilno dimenzionirana. U praksi potpuna kompenzacija nije moguća, jer struje nisu potpuno kapacitivne, odnosno induktivne i prema tome ne pretječu, odnosno ne zaostaju točno za 90^0. Imaju, naime, uvijek i neku radnu komponentu, koja je međutim toliko mala, da je možemo u računu zanemariti.

Potreban induktivitet prigušnice možemo odrediti na vrlo jednostavan način. Ako je C kapacitet svakog faznog vodiča prema zemlji, teku od faze sa zemljospojem prema svakoj od dviju neoštećenih faza struje, koje su po jačini jednake

$$I_{C1} = I_{C2} = U \cdot \omega \cdot C,$$

gdje je

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

kružna frekvencija. Budući da su te dvije struje pomaknute u fazi za 60^0, dat će rezultirajuću struju apsolutne veličine

$$I_C = (I_{C1} + I_{C2}) \cdot \cos 30^0 = 2 \cdot I_{C1} \cdot \cos 30^0 = \sqrt{3} \cdot U \cdot \omega \cdot C.$$

U strujnom krugu teći će kroz zemljospoj i prigušnicu uzemljenja, pod djelovanjem faznog napona, induktivna struja jačine

$$I_L = \frac{U_f}{\omega \cdot L} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot L},$$

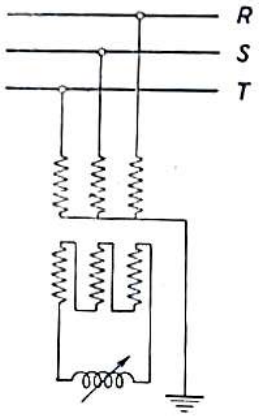
koja mora biti jednaka prije dobivenoj rezultirajućoj struji obiju kapacitivnih struja. Tako mora biti induktivitet prigušnice uzemljenja

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C}.$$

U praksi je dovoljna približna kompenzacija struje zemljospoja. Ukoliko se struja zemljospoja mijenja u toku pogona, jer

iskapčamo, odnosno ukapčamo dalekovode, možemo induktivnost prigušnice uzemljenja prilagoditi na taj način, što ćemo prigušnicu izvesti s otcjepima i podešavati je postepeno prema stvarnoj struji zemljospoja.

Mjesto prigušnice uzemljenja možemo upotrebiti i prigušni transformator. Prema sl. 49 primarni namotaji prikopčani su na mrežu, a u sekundarnom namotaju u trokutnom spoju uključena je prigušnica, koja se može regulirati. Ona djeluje kao i prigušnica uzemljavanja.



Slika 49.
Prigušni transformator

Ovom prilikom ćemo još objasniti pitanje kako moramo postupati s raznim uzemljenjima. U svakoj transformatorskoj stanici imamo razna uzemljenja, naime pogonsko uzemljenje na strani niskog napona, zaštitno na strani niskog napona, zaštitno na strani visokog napona i možda još uzemljenje gromobranskih uređaja.

Možemo li spajati sva ta uzemljenja? Na to pitanje je zapravo teško općenito odgovoriti, a i propisi pojedinih država ne daju na to pitanje jednak, odnosno jednako razumljiv odgovor. Općenito možemo reći, da možemo ako je moguće povezivati pojedinačna uzemljenja, jer na taj način postižemo lakše i jeftinije potreban mali prelazni otpor. To zajedničko uzemljenje moramo, razumije se, dimenzionirati prema najmanjem dozvoljenom prelaznom otporu, koji je izračunat za pojedine slučajeve. Ne smijemo povezivati uzemljenja samo u onim slučajevima, kad zbog toga povezivanja ne dobivamo na zajedničkom uzemljenju nedozvoljeno velike dodirne napone. Na to zajedničko uzemljenje mogu biti priključeni zaštitni vodovi niskonaponske zaštite. Moramo, nadalje, voditi računa o tome, da pojedinačna uzemljenja teško možemo razdvajati,

jer su preko raznih metalnih konstrukcija i t. d. često neposredno međusobno povezana, odnosno, povezana su preko zemlje. Morali bismo povezati, na primjer, omotače kablova visokog napona sa zaštitnim uzemljenjem visokog napona, omotače kablova niskog napona sa zaštitnim uzemljenjem niskog napona. Međutim, ti kablovi često leže blizu jedan drugome, pa su prema tome u više ili manje provodnoj vezi preko zemlje.

Obično povezujemo zaštitno uzemljenje uređaja visokog napona i uređaja niskog napona. S druge strane pak je preporučljivo, da je uzemljenje zvjezdišta mreže niskog napona odvojeno od zaštitnog uzemljenja visokog napona. To pitanje javlja se u transformatorskim stanicama. Tada je najbolje da načinimo uzemljenje zvjezdišta na određenoj udaljenosti od same transformatorske stanice. U transformatorskim stanicama, koje na strani niskog napona imaju vlastitu potrošnju, a ne napajaju i druge potrošače, u većini slučajeva povezujemo sva uzemljenja.

Još se postavlja pitanje, kako treba uzemljiti gromobranske uređaje i odvodnike prenapona. Poznato je, da je struja groma velika, više desetina tisuća ili čak stotina tisuća ampera, ali da traje vrlo kratko vrijeme, nekoliko milisekunda. Ta velika struja groma prouzrokuje u uzemljenju gromobranskog uređaja vrlo veliki napon prema prirodnom potencijalu zemlje. Zbog toga čitava zgrada kad u nju udari grom, dobije veći potencijal, jer bi inače nastali proboji. Zato također zahtijevamo, da su s gromobranom povezani i razni metalni dijelovi zgrade, naročito onda, ako prolaze kroz čitavu zgradu, kao na primjer vodilice dizala, željezna stepeništa i t. d. Ako je moguće, izrađujemo posebno uzemljenje za gromobranski uređaj i prenaponske odvodnike. To uzemljenje većinom povezujemo u zemlji metalnim vodičima s ostalim uzemljenjima.

d) Izvedba uzemljivača

Uzemljivač je onaj dio uređaja uzemljenja koji nam omogućuje, da dobijemo potencijal zemlje i eventualne struje zemljospoja odvaja u zemlju. Kao uzemljivač upotrebljavamo u zemlju zakopanu ploču, cijev za uzemljenje ili traku za uzemljenje, što polažemo ispod površine zemlje, na dubinu od 30 do 50 cm. Kao pomoćne uzemljivače upotrebljavamo još i vodovodne mreže, koje u većini slučajeva imaju vrlo male prelazne otpore.

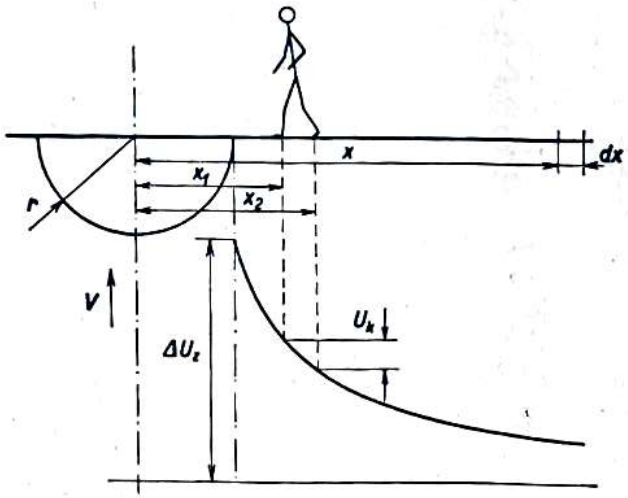
Uzemljivač mora biti u neposrednoj vezi sa zemljom. Pritom je važno, da ima koliko god je moguće manji prelazni otpor.

Električna struja teče kroz uzemljivač u zemlju, pa moramo imati na umu, da zemlja ima znatno veći specifični otpor nego metali. Tabela II daje nam pregled specifičnih otpora raznih vrsti tla. Mjerimo ga u Ωm, ili kao prije u Ωcm, što su znatno veće jedinice od Ω mm²/m, koju obično upotrebljavamo za specifični otpor metala. Vrijedi, naime, da je

$$1\ \Omega\,\mathrm{m} = 10^2\ \Omega\,\mathrm{cm} = 10^6\ \Omega\,\mathrm{mm}^2/\mathrm{m}.$$

Ako, dakle, uspoređujemo specifični otpor dobrog provodnika, na primjer bakra ($\rho_{Cu} = 0{,}178\ \Omega\,\mathrm{mm}^2/\mathrm{m} = 1{,}78 \cdot 10^{-8}\ \Omega\,\mathrm{m}$) sa specifičnim otporom razmjerno dobro vodljivog tla, na primjer humusa ili ilovače ($\rho = 100\ \Omega\,\mathrm{m}$), vidimo, da je posljednji približno $5 \cdot 10^9$-puta veći.

Uzemljivač ima za toliki specifični otpor razmjerno malu površinu. Zbog toga nastaje u njegovoj blizini u zemlji veliki pad napona, koji je na svakom mjestu razmjeran gustoći struje, prema tome je u blizini uzemljivača najveći, a opada postepeno s povećavanjem udaljenosti od njega. Na taj način ima zemlja u okolini uzemljivača veći potencijal nego što je prirodni potencijal same zemlje. U blizini uzemljivača nastaje takozvani naponski lijevak. Prelazni otpor uzemljivača možemo lako izračunati. Razmotrit ćemo samo najjednostavniji primjer.



Slika 50. Naponski lijevak oko uzemljivača

Izračunat ćemo prelazni otpor uzemljivača u obliku polukugle polumjera r, prema sl. 50. Gustoća struje na površini S_r polukugle uzemljivača je

$$g_r = \frac{I}{S_r} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2},$$

gdje je I ukupna struja, koja teče kroz uzemljivač u zemlju.

Neka u našem slučaju zemlja bude homogena, i neka se struja na sve strane širi ravnomjerno. Tada je njena gustoća u zemlji na udaljenosti x od središta uzemljivača

$$g_x = \frac{I}{S_x} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot x^2}.$$

Pri tome nastane u zemlji električno polje s jačinom pada napona po jedinici dužine, odnosno

$$E = \frac{I \cdot \rho}{S_x} = g_x \cdot \rho.$$

Na taj će način svaka točka u zemlji, na udaljenosti x od središta uzemljivača, dobiti potencijal

$$V = -\int_{\infty}^{x} E \cdot dx = -\int_{\infty}^{x} g_x \cdot \rho \cdot dx = -\frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{\infty}^{x} \frac{dx}{x^2} = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot x},$$

jer zemlja mora imati u beskonačnoj udaljenosti od uzemljivača prirodni potencijal zemlje.

Najveći potencijal V_{max} dobiva sam uzemljivač. Taj potencijal jednak je padu napona ΔU_z uzemljivača. Tako da je

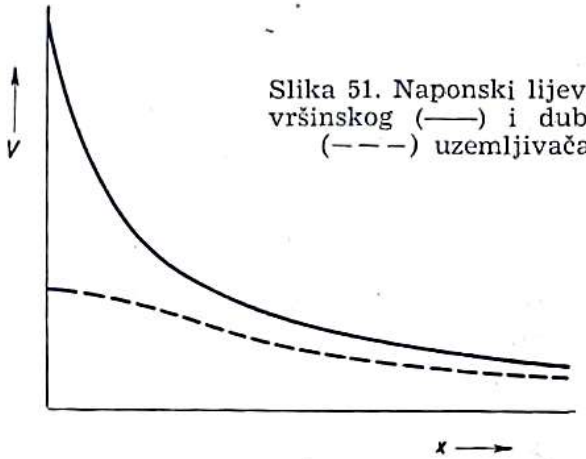
$$V_{max} = \Delta U_z = -\frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{\infty}^{x} \frac{dx}{x^2} = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r}.$$

Između bilo koje dvije točke na površini zemlje na udaljenosti x_1, odnosno x_2 od središta kugle, imamo, razumije se, također razliku potencijala, odnosno napon, naime

$$U_k = V_2 - V_1 = -\frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x^2} = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2}\right).$$

Taj napon može postati opasan ako koračamo u smjeru prema uzemljivaču, a kroz uzemljivač teče velika struja. Zato taj napon nazivamo **naponom koraka**. Zbog toga se stupu električnog dalekovoda smijemo približavati samo skokovima, ako neka faza na stupu ima zemljospoj.

Dobit ćemo manje napone koraka, ako uzemljivač zakopamo barem 3 do 5 m duboko u zemlju i ako je priključni vod za uzemljenje u zemlji izoliran. U dohvatljivom području mora također biti izoliran, jer u neposrednoj okolini možemo imati između njega i zemlje velike napone.



Slika 51. Naponski lijevak površinskog (——) i dubinskog (– – –) uzemljivača

Sl. 51 prikazuje, na primjer, naponski lijevak površinskog i dubinskog uzemljivača istih dimenzija kod određenih uslova.

Pad napona u uzemljenju je, prema Ohmovu zakonu, jednak: struja, puta prelazni otpor R_z uzemljenja, dakle

$$\Delta U_z = I \cdot R_z.$$

Iz oba obrasca za pad napona uzemljenja proizlazi, da je prelazni otpor uzemljivača u obliku polukugle na površini zemlje dat izrazom

$$R_z = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r}.$$

Sličnim, ali težim računom, možemo odrediti i prelazni otpor uzemljivačâ drugih oblika, na primjer ploče za uzemljenje, cijevi, trake ili užeta i t. d. Te račune ovdje ne ćemo izvoditi. U tabeli III navedeni su prelazni otpori raznovrsnih uzemljivača; u prvoj koloni točni obrasci, a u drugoj približni, dovoljni za praktičan račun.

Općenito vidimo, da je prelazni otpor obrnuto razmjeran veličini površine uzemljivača. Prelazni otpor svakog uzemljivača možemo, dakle, smanjiti na taj način, da povećavamo njegovu površinu. To, međutim, nije moguće uvijek izvesti. Dužinu užeta za uzemljenje ili trake za uzemljenje možemo povećavati koliko hoćemo, ali ne možemo uzeti koliko god hoćemo velike ploče za uzemljenje ili pak cijevi za uzemljenje. U tim slučajevima možemo pomoći sebi na taj način, da upotrebimo više paralelno zakopanih uzemljivača. Pritom ne smijemo očekivati, da će se ukupni prelazni otpor smanjiti razmjerno s brojem paralelno položenih uzemljivača.

Uzmimo n paralelnih uzemljivača, od kojih svaki ima prelazni otpor R_i! Jedino u slučaju da su pojedini uzemljivači toliko međusobno udaljeni, da se nalaze izvan naponskog lijevka drugih uzemljivača njihove provodljivosti se zbrajaju. Zajednički prelazni otpor takvog grupnog uzemljivača bio bi, dakle, dat izrazom

$$R_z = \frac{1}{\sum_1^n \left(\frac{1}{R_i}\right)}.$$

Kad pojedini uzemljivači imaju u posebnom slučaju isti prelazni otpor R, prelazni otpor grupnog uzemljivača s n pojedinačnih uzemljivača bit će

$$R_z = \frac{R}{n}.$$

Međutim, kada su pojedinačni uzemljivači grupnog uzemljivača međusobno tako blizu, da pojedini uzemljivač leži u naponskom lijevku drugoga, tada je prelazni otpor R_z' grupnog uzemljivača manji od gornje vrijednosti

$$R_z' = \eta \cdot R_z,$$

kod čega mora biti

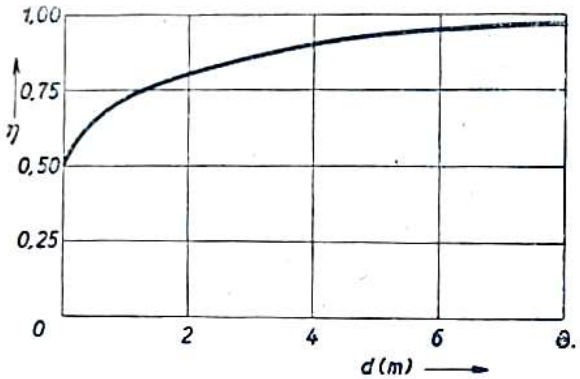
$$0 < \eta < 1.$$

η možemo nazvati stepenom iskoristivosti grupnog uzemljivača.

Stepen iskoristivosti grupnog uzemljivača je to manji, što se pojedini uzemljivači nalaze bliže jedan drugome. Možemo izračunati i prelazni otpor, odnosno stepen (djelovanja) iskoristivosti grupnog uzemljivača, ali je račun daleko teži i zamršeniji. Zato ga

ovdje ne ćemo izvoditi. Navest ćemo samo još nekoliko praktičnih podataka.

Bez sumnje nema smisla da polažemo dva uzemljivača jednog pokraj drugoga. Paralelne uzemljivače grupnog uzemljivača moramo namjestiti u međusobnim razmacima od 3 do 6 m, da bismo postigli stepen grupnog uzemljvača od 40 do 90%. Veće vrijednosti stepena iskoristivosti postižemo, ako je među pojedinim uzemljivačima dovoljan razmak. Sl. 52. prikazuje, na primjer, stepen iskoristivosti grupnog uzemljivača pri određenim uslovima, koji se sastoji od dvije cijevi za uzemljenje, u ovisnosti o razmaku oba uzemljivača.



Slika 52. Stepen iskoristivosti grupnog uzemljivača sastavljenog od dvije cijevi u ovisnosti o međusobnom razmaku

Potrebno je naglasiti, da prelazni otpor uzemljivača nije konstantan, nego se često mijenja u dosta širokim granicama u ovisnosti o vlažnosti zemlje, većinom u razmjeru do 1 : 5. Za vlažnih godina prelazni otpor je manji, za suhih je veći. Pravilno dimenzionirano uzemljenje je onda, ako je prelazni otpor uzemljivača dovoljan i u sušno doba.

Ponekad se može dogoditi da se zemlja oko uzemljivača potpuno isuši. Ako, naime, kroz uzemljivač teče duže vremena vrlo velika struja, ona će zagrijati okolnu zemlju tako jako, da se polako osuši. Tako se prelazni otpor uzemljenja može toliko povećati, da postane potpuno neupotrebljiv. Kažemo, da je uzemljivač zatrovan. Moramo načiniti drugo uzemljenje na dovoljnoj udaljenosti od prvoga. Ako oko nekog uzemljivača vlažimo zemlju, na primjer rastopinom sode, smanjujemo prelazni otpor u doba suše. Ta mjera nije dovoljno djelotvorna, ako se ne izvodi redovito i savjesno. Neki preporučuju da se u blizini uzemljivača zakopaju veće količine nepročišćene soli. Kišnica polako rastapa sol i raznaša je po neposrednoj okolini uzemljivača. Na taj način dobijemo nakon nekog vremena manji prelazni otpor uzemljenja.

U pravilu, uzemljivače trebamo polagati po mogućnosti u stalno vlažnu zemlju. To je u većini slučajeva bolje nego da ih stavljamo direktno u vodu.

Uzemljivače se ne smije polagati u čistu tekuću vodu, već ih treba polagati u vlažnu zemlju u blizini vode. Čista voda, naime, ima vrlo veliki specifični otpor.

Važno je, nadalje, da uzemljivač oblika ploče polažemo vertikalno u zemlju. Ako položimo ploču u zemlju vodoravno, može se dogoditi da se na donjoj strani zemlja sabije i odvoji od ploče. U tom slučaju nema više tijesna dodira, odnosno neposrednog dodira između ploče i zemlje i prelazni otpor uzemljivača postaje znatno veći.

Isto je tako potrebno da se zemlja oko uzemljivača dobro nabije, da se osigura tijesni kontakt između uzemljivača i zemlje. Uzemljivač ne smijemo bojadisati, jer bismo na taj način stvorili izolacioni sloj između zemlje i uzemljivača. Oko uzemljivača i u njegovoj bližoj okolini treba uvijek da bude ilovače ili sitnog zrnatog pijeska. Šljunkovita ili kamena tla imaju, naime, znatno veći specifični otpor. Dalje od uzemljivača nije više naročito važan specifični otpor tla.

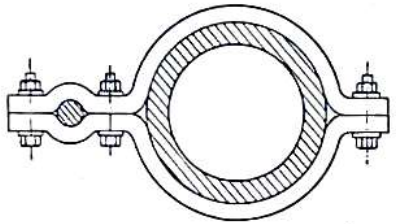
Ploče za uzemljenje moraju biti velike barem 0,5 m², bolje je, ako su 1 m². Mogu biti od bakra, odnosno od pocinčanog ili poolovljenog željeza. Prelazni otpor takve ploče za uzemljenje razmjerno je velik, u pijesku ili u ilovači od 15 do 20 Ω. Možemo upotrebiti i masivnije otpadno željezo, na primjer kotlovske ploče, stare tračnice ili slično.

Slične prelazne otpore možemo postići i cijevnim uzemljivačem. Upotrebljavamo cijevi promjera 25 do 50 mm (1 do 2"), dužine 2 do 3 m.

Najmanje prelazne otpore postižemo uzemljivačem u obliku trake ili užeta, presjeka otprilike 50 mm², odnosno promjera približno 8 mm. Trakom ili užetom dužine 20 m, u pijesku ili ilovači postižemo prelazni otpor približno 10 Ω, a dužine 100 m, približno 3 Ω. Tako vidimo, da je doista vrlo teško postići male prelazne otpore uzemljenja. U većini slučajeva to je moguće samo s grupnim uzeljivačima. Obično polažemo dužu traku ili uže u zemlju, a na njih priključujemo na povoljnim mjestima još i ploče za uzemljenje ili cijevne uzemljivače.

Najbolja uzemljenja postižemo, ako koristimo u zemlji položene cijevne sisteme vodovoda, plina, kanalizacije, cijevi uređaja za grijanje i t. d. Prelazni otpor razgranatih cijevnih sistema u zemlji samo je od 0,1 do 1 Ω, a u većini slučajeva ispod 0,5 Ω. Teško možemo točno izmjeriti taj prelazni otpor, jer ne poznajemo razmještaj cijevi i jer se struje prenašaju u području naponskih lijevaka još i na susjedne cijevne sisteme. Zbog toga ne možemo dobiti stvarno neutralnu zemlju.

Zbog malenog prelaznog otpora trebamo uvijek pokušati da koristimo takve cijevne sisteme za uzemljenja. Poteškoće bismo imali samo kod istosmjerne struje, koja prouzrokuje koroziju, ako teče duže vremena. Neki se čak i protive tome, da se vodovodne mreže koriste za uzemljenja električnih uređaja, ali za takav stav ne mogu navesti stvarne razloge. Jedino moramo paziti na neke specifičnosti.



Slika 53. Priključna obujmica za vezu između užeta za uzemljenje i vodovodne cijevi

Slika 54. Priljučna spojnica na vodovodnu cijev za vod za uzemljenje

Potrebno je da načinimo trajno dobru metalnu vezu između vodova za uzemljenje i cijevne mreže. Zato upotrebljavamo odgovarajuće obujmice za priključak, na primjer, prema sl. 53. Kad načinimo takav spoj u posebnim slučajevima pod zemljom, moramo spoj još i zalemiti i omotati zaštitnim omotačem. Inače se priključak može izvesti prema sl. 54. pomoću posebne spojnice, kod koje uže za uzemljenje omotamo oko cijevi i nategnemo pomoću vijka.

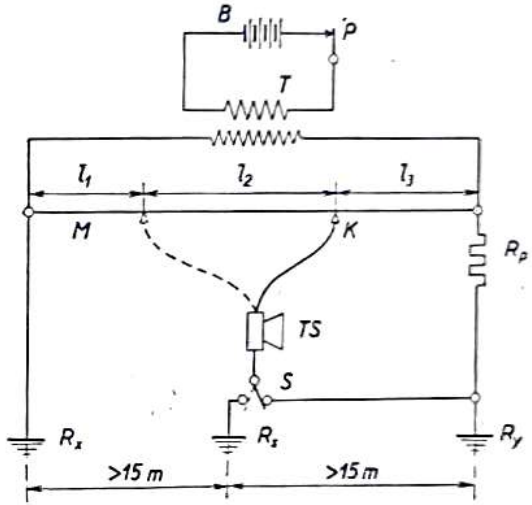
Posebno moramo voditi račun o vodomjeru. Potrebno je da ga metalno premostimo, jer ga kod pregleda mijenjamo, pa u tom slučaju ne bismo imali metalne veze s uzemljenim cijevnim sistemom.

U novije vrijeme negdje se upotrebljavaju za vodovod cijevi od izolacionog materijala. U tom slučaju, razumije se, vodovodna

mreža nije upotrebljiva za uzemljenje. Negdje su opet počeli upotrebljavati vodovodne cijevi s posebnom vijčanom obujmicom i izolacionim brtvilom. Takvo izolirajuće brtvilo povećava u velikoj mjeri prelazni otpor vodovodnog sistema, koji više nije pouzdan kao uzemljivač.

e) Kontrola uzemljivača

Prelazni otpor uzemljivača moramo više puta kontrolirati. Moramo ga izmjeriti prije početka pogona i za vrijeme pogona, za vrijeme popravaka i pregleda uređaja. Moramo se uvjeriti da li je prelazni otpor dovoljno malen, koliko je potrebno u svakom datom slučaju. Povremena mjerenja daju nam pregled o tome, kako se prelazni otpor uzemljivača mijenja. Vrlo često nas mjerenje upozorava na to, da prelazni otpor nije zadovoljavajući.



Slika 55. Wiechertov spoj za mjerenje prelaznog otpora

Prelazni otpor možemo mjeriti svakom mjernom metodom prikladnom i za mjerenje otpora elektrolita. Moramo, naime, upotrebljavati izmjeničnu struju, da eliminiramo griješke zbog polarizacijskog napona. Tako, na primjer, upotrebljavamo Wiechertov spoj, prema sl. 55. Želimo izmjeriti prelazni otpor R_x lijevog uzemljivača. Potreban nam je još pomoćni uzemljivač, koji neka ima bilo kakav prelazni otpor R_y, i sonda s prelaznim otporom R_s.

Prelazni otpor pomoćnog uzemljivača neka bude približno jednak prelaznom otporu uzemljivača, kojega prelazni otpor hoćemo izmjeriti. Sonda služi jedino za mjerenje napona, pa može imati i veći prelazni otpor. Primarnu stranu transformatora T na-

pajamo iz baterije B niskog napona preko preklopke P. Na sekundarni viši napon transformatora priključena je mjerna žica M, koja je na jednoj strani neposredno priključena na uzemljivač s traženim prelaznim otporom R_x, na drugoj strani je preko odgovarajućeg otpora s otporom R_p spojena s uzemljivačem, koji ima prelazni otpor R_y. Klizni kontakt K mjerne žice vezan je preko telefonske slušalice TS na preklopku S, koja uspostavlja neposrednu vezu ili s pomoćnim uzemljivačem ili sa sondom.

Prigodom mjerenja postavimo preklopku S najprije u položaj nacrtan punom linijom, a zatim tražimo po mjernoj žici onaj položaj kliznog kontakta K, kod koga u telefonskoj slušalici čujemo najmanji šum. Zatim prebacimo preklopku S u položaj nacrtan isprekidanom linijom i nastavljamo mjerenje kao i prije. Pri tome će klizni kontakt biti u crtkanom položaju. Tim mjerenjem odredimo udaljenosti l_1, l_2 i l_3. Traženi prelazni otpor uzemljivača je

$$R_x = R_p \cdot \frac{l_1}{l_3}.$$

Istovremeno možemo odrediti i prelazni otpor pomoćnog uzemljivača, koji je dat sa

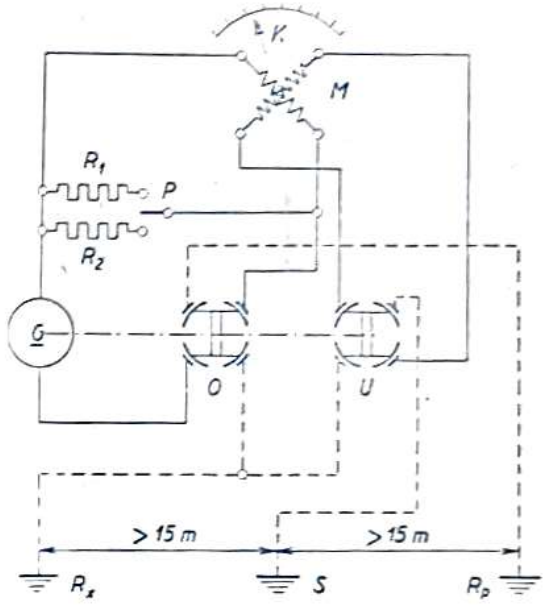
$$R_y = R_p \cdot \frac{l_2}{l_3}.$$

Nedostatak ove i sličnih mjernih metoda sastoji se u tome, što moramo izračunavati traženi prelazni otpor. Zato se grade specijalni aparati za mjerenje prelaznog otpora, kod kojih nam kazaljka na skali instrumenta neposredno pokazuje prelazni otpor. Kod mjerenja se moramo pridržavati uputa priloženih uz instrument.

Vrlo je praktičan, na primjer, instrument za mjerenje prelaznog otpora »Meg«, odnosno »Megger«, tvrtke Evershed. Spoj toga instrumenta prikazan je na sl. 56.

Instrument ima ugrađen generator G za istosmjernu struju. Kao mjerni instrument služi mjerač otpora ili ohmmetar M, koji ima strujni i naponski svitak. Kroz oba svitka mora teći istosmjerna struja. Ona, međutim, nije prikladna za mjerenje prelaznog otpora uzemljivača, jer bi naponi polarizacije utjecali na točnost rezultata mjerenja. Zato instrument ima prekidač O smjera struje u krugu struje, te prema tome kroz oba uzemljenja teče izmjenična struja, to jest kroz uzemljenje s traženim prelaznim otporom R_x i kroz pomoćni uzemljivač R_p. Naponski svitak instrumenta za mjerenje

otpora mjeri naponsku razliku između uzemljivača s traženim prelaznim otporom R_x i sonde S. Taj napon je izmjenični i moramo ga dovoditi naponskom svitku instrumenta preko usmjerivača U. Tako će istosmjerne struje teći kroz ogranke nacrtane punim linijama, a izmjenična struja kroz ogranke nacrtane crtkanim linijama.



Slika 56. Spoj instrumenata za mjerenje izolacije »Megger«

Kad okrećemo ručicu generatora, kazaljka K instrumenta pokazuje na skali traženi prelazni otpor R_x. Otpori R_1 i R_2, u vezi s preklopkom P, služe za mijenjanje mjernog područja.

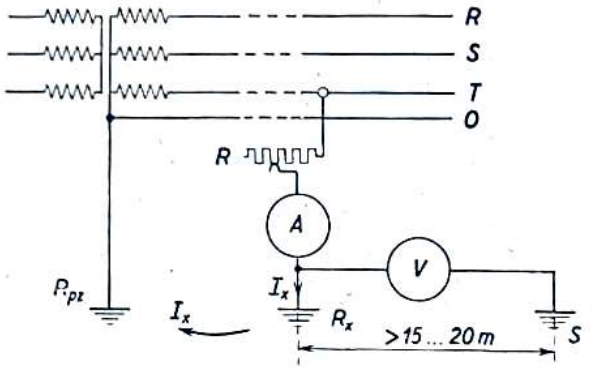
Kod svih mjerenja prelaznog otpora uzemljivača treba nam, dakle, još i pomoćni uzemljivač i naponska sonda. Razumije se, da svi uzemljivači moraju biti udaljeni barem 15 m jedan od drugog, da ne bi ležali u međusobnom naponskom lijevku. Što su uzemljivači međusobno manje udaljeni, veće su griješke kod mjerenja.

Prelazni otpor možemo lako odrediti i mjerenjem struje i napona. Općenito, taj način mjerenja nije potpuno točan. Upotrebljavamo napon mreže. Spoj načinimo prema sl. 57. Promjenljivim otporom R podesimo struju u vodu za uzemljenje, čiji je prelazni otpor, kojega hoćemo mjeriti, R_x na jačinu, koja odgovara približno struji kvara. Tu struju I_x pokazuje nam ampermetar. Voltmetar, koji neka ima veliki nutarnji otpor, mjeri napon U između uzemljivača i sonde S, udaljene barem 15 do 20 m.

Strujni krug se zatvara kroz pogonsko uzemljenje. Prelazni otpor uzemljivača bit će, dakle

$$R_x = \frac{U_x}{I_x}.$$

Taj spoj ne možemo upotrebljavati kad zvjezdište sistema nije uzemljeno, odnosno, kad ga za vrijeme mjerenja ne možemo uzemljiti.



Slika 57. Određivanje prelaznog otpora uzemljenja mjerenjem struje i napona

Na jednostavan način možemo provjeriti stanje uzemljenja također i osiguračem. Načinimo, naime, kratki spoj između faze i uzemljenja preko osigurača, budući da osigurač s nazivnom strujom I_{no} pregara istom kod struje

$$I_o \simeq 3 \cdot I_{no},$$

i da je prelazni otpor takovog uzemljenja

$$R_p < \frac{U_f}{3 \cdot I_{no}}.$$

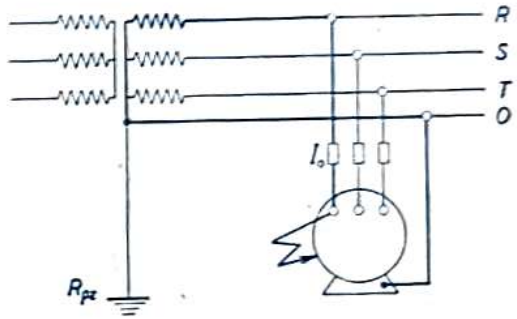
Možemo načiniti više uzastopnih pokusa, pri čemu uzimamo svaki put slabiji osigurač. Tako možemo ispitati da li uzemljenje zadovoljava obzirom na traženi prelazni otpor.

Taj način provjeravanja prikladan je naročito za zaštitna uzemljenja. Načinimo kratki spoj između stezaljke neke od faza i zaštitnog kućišta. Osigurač u dotičnoj fazi dovoda mora pregorjeti. Ako osigurač ne pregori, uzemljenje moramo poboljšati, ako slabiji osigurač nije dovoljan.

Prelazni otpor gromobranskih uzemljenja izvodimo odgovarajućim visokofrekventnim mjernim metodama. Grom, kao vrlo kratkotrajna pojava, ima sve osobine visokofrekventnih struja i zbog toga je jedino pravilno, ako prelazni otpor gromobranskog uzemljenja mjerimo visokofrekventnim strujama, kod čega dolazi do izražaja izmjenični otpor (impendancija).

7. NULOVANJE

Nulovanje kao zaštitna mjera sastoji se u tome, da zaštitno kućište trošila povezujemo s neutralnim vodičem razvodnog sistema, kao što prikazuje sl. 58.



Slika 58. Nulovanje

Struja kvara opet teče kroz zatvoreni strujni krug, na slici nacrtan debljom linijom. Kod nulovanja upotrebljavamo neutralni vodič umjesto zemlje, i prilike su, ustvari, sasvim jednake. Zaštitu i opet postižemo istom onda, ako osigurač zaštićenog trošila iskopča odmah, netom nastane kvar, i struja kvara teče preko osigurača. Budući da neutralni vodič ima obično manji otpor od prelaznog otpora zaštitnog i pogonskog uzemljenja, možemo očekivati da će pod djelovanjem faznog napona u strujnom krugu kvara teći dovoljno velika struja, koja će pregorjeti osigurač i isključiti trošilo pouzdano i brzo. To je struja jednofaznog kratkog spoja, a njezina jačina ovisi o ukupnom otporu čitavog strujnog kruga od električne centrale do mjesta kratkog spoja. U blizini jake električne centrale struja kratkog spoja vrlo je velika. U razgranatim razvodnim mrežama, koje se napajaju preko transformatora, preko dugih dalekovoda visokog napona i dalekovoda srednje visokog napona, koji imaju priključena razmjerno vrlo mala opterećenja, pa prema tome

i odgovarajuće male presjeke vodova, struja kratkog spoja bit će malena. Struja kratkog spoja dostiže u snažnim gradskim mrežama s velikim presjecima vodova i na kratkim udaljenostima u većini slučajeva nekoliko tisuća ili tek više stotina ampera. U razvodnim mrežama u pokrajini struja kratkog spoja razmjerno je mala; u izuzetnim slučajevima može se dogoditi da bude čak ispod 100 ampera. Jačinu struje kratkog spoja možemo odrediti bilo računski, bilo pokusima.

Nulovanje je na prvi pogled jako jednostavna i pouzdana zaštitna mjera, ali nije uvijek upotrebljiva. Ima svoje nedostatke, koje moramo pobliže upoznati.

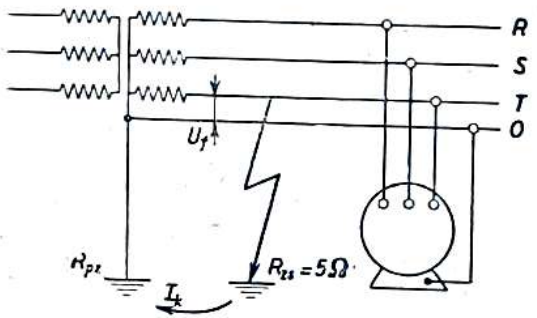
Prije svega moramo razmotriti, što će se dogoditi ako fazni vodič mreže dobije spoj sa zemljom, prema sl. 59.

Kao što znamo, takav zemljospoj ima dosta veliki prelazni otpor, a možemo računati s najmanjim prelaznim otporom, koji se u praksi pojavljuje: 5 Ω. Kroz zemljospoj i kroz pogonsko uzemljenje s prelaznim otporom R_{pz} teče struja kvara

$$I_k = \frac{U_f}{R_{pz} + 5}$$

a neutralni vodič dobit će na svom početku napon prema zemlji

$$U_o = I_k \cdot R_{pz}.$$



Slika 59. Zemljospoj u mreži s nulovanjem

Taj napon dobiva, razumije se, čitav neutralni vodič, pa prema tome i svi oklopi i ostali metalni dijelovi svih nulovanih trošila. Kad je taj napon dosta velik, opasno je dodirnuti omotač takvih trošila, ako imamo istovremeno dobar spoj sa zemljom. Zato napon neutralnog vodiča prema zemlji ne smije biti opasno velik. To postižemo na taj način, da prelazni otpor pogonskog uzemljenja učinimo dovoljno malenim. Opet je dozvoljen napon 50 V prema zemlji.

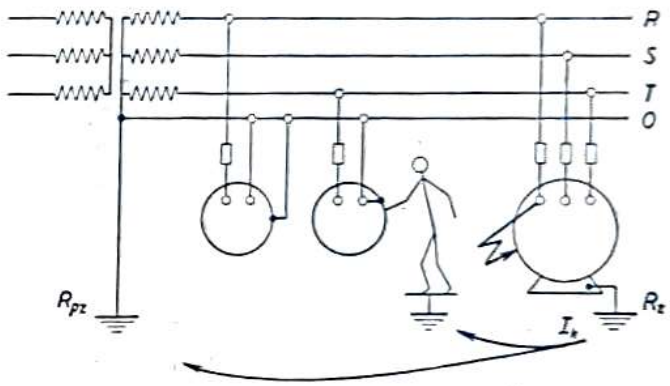
Iz dviju prijašnjih formula slijedi razmjer

$$\frac{U_o}{R_{pz}} = \frac{U_f}{R_{pz} + 5},$$

iz kojega možemo izračunati najveći dozvoljeni prelazni otpor pogonskog uzemljenja, kad hoćemo da u priključenoj mreži upotrebimo nulovanje kao zaštitnu mjeru. Za napon 380/220 V dobijemo

$$R_{pz} \leq \frac{5 \cdot U_o}{U_f - U_o} = \frac{5 \cdot 50}{220 - 50} \simeq 1{,}5\ \Omega.$$

Propisi nekih država dozvoljavaju nešto veći napon od 65 V neutralnog vodiča prema zemlji, i zahtijevaju tome odgovarajući najveći dozvoljeni prelazni otpor 2 Ω pogonskog uzemljenja. Ako hoćemo upotrebiti u mreži nulovanje kao zaštitnu mjeru, mora, dakle i pogonsko uzemljenje uvijek biti vrlo dobro i treba ga stalno kontrolirati, jer se lako mogu kod zemljospoja dobiti opasno veliki naponi prema zemlji i na omotačima svih uzemljenih trošila, što se, naravno, ne smije dopustiti.

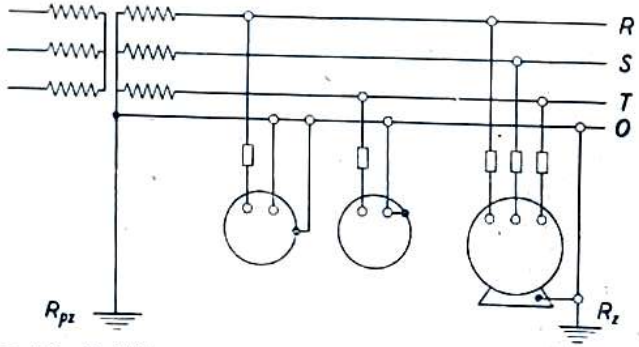


Slika 60. Zaštitno uzemljenje nije dozvoljeno u mreži, u kojoj je nulovanje provedeno

U našem računu smo pretpostavljali, da prelazni otpor zemljospoja praktično nije nikada veći od 5 Ω. S tom vrijednošću smijemo računati samo kod zemljospoja na samoj mreži.

Moramo uzeti u obzir i slučaj kad je na mrežu priključeno, osim nulovanih trošila, još i trošilo, na primjer motor, kojeg je kućište uzemljeno, kako je prikazano na sl. 60. Ako je zaštitno uzemljenje

izvedeno prema propisima, njegov prelazni otpor kod većih trošila bit će razmjerno malen, na svaki način manji od 5 Ω. Spoj između faze i kućišta kod takvog uzemljenog trošila ustvari je zemljospoj preko manjeg prelaznog otpora, nego što smo prije računali. Ako bismo u naš račun stavili manji prelazni otpor zemljospoja, dobili bismo tako malen prelazni otpor pogonskog uzemljenja, da ga ne bi bilo moguće izvesti. Općenito moramo očekivati da će osigurač uzemljenog trošila odmah pregorjeti, čim nastane kvar. Moramo, međutim, imati na umu, da je osigurač pod nadzorom potrošača. U slučaju nemarnosti može se lako dogoditi da osigurač bude premošten, odnosno, da ne iskopča kod spoja s omotačem. Tada preko zaštitnog

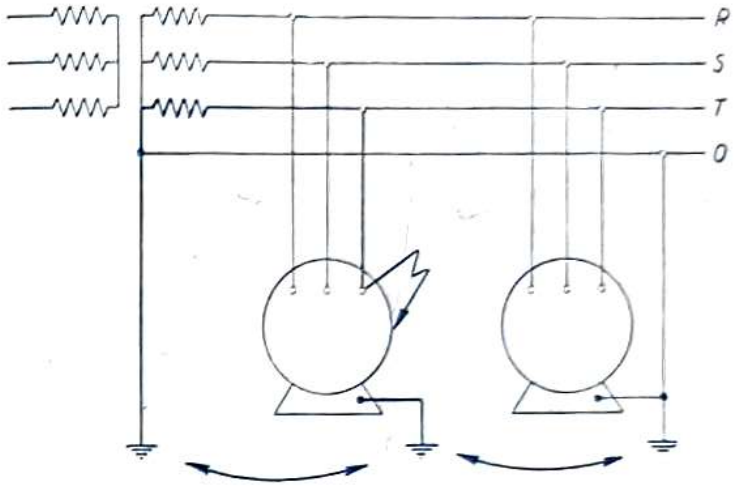


Slika 61. Zaštitno uzemljenje dozvoljeno je u mrežama u kojima je provedeno nulovanje, ako istovremeno načinimo vezu i s neutralnim vodičem

uzemljenja teče struja kvara prema pogonskom uzemljenju. Ako smo pak, prema sl. 60., istovremeno u dodiru sa kućištem nulovanog trošila, struja kvara teći će dijelom i kroz čovjeka i kroz neutralni vodič, neposredno prema zvjezdištu sistema. To nije dopušteno. Može se dogoditi da i prelazni otpor zaštitnog uzemljenja bude prevelik i da ne teče dovoljno velika struja kvara, da bi osigurač mogao pregorjeti. U tim slučajevima tekla bi stalno struja kvara kroz zaštitno uzemljenje trošila i kroz pogonsko uzemljenje u centrali ili transformatorskoj stanici, zbog čega bi i neutralni vodič i metalno kućište svih nulovanih trošila možda dobili nedozvoljen i opasno velik napon prema zemlji.

Zbog svega toga ne smijemo upotrebljavati zaštitno uzemljenje u mrežama, u kojima je provedeno kao zaštita nulovanje. Dopušteno je, međutim, da pojedina trošila i uzemljimo i nulujemo, kako je prikazano na sl. 61.

Ne smijemo, dakle, povezivati omotač trošila s neutralnim vodičem i uzemljiti ga ni u slučaju prikazanom na sl. 62., ako su u istoj mreži trošila, koja su samo uzemljena. U tom slučaju neutralni vodič može dobiti isto tako nedopušteno velik napon

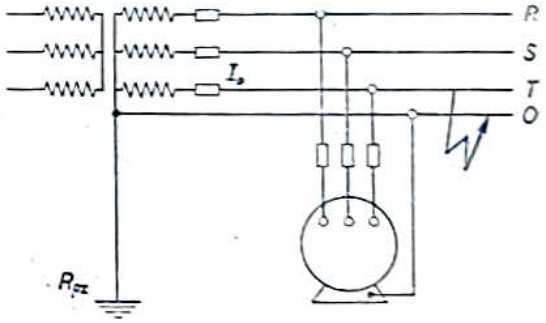


Slika 62. Slučaj kvara na trošilu, koje je samo uzemljeno, a priključeno je na mrežu s uzemljenim neutralnim vodičem

prema zemlji, ako je uzemljenje uzemljenog trošila razmjerno dobro i ako je trošilo slabo osigurano, da struja kvara trajno teče preko njegova uzemljenja prema pojedinim uzemljivačima neutralnog vodiča.

Pogledajmo još što će se dogoditi kod drugog pogonskog kvara na našoj mreži, to jest kod jednofaznog kratkog spoja.

Prema sl. 63. neka jedan od faznih vodiča dobije spoj s nultim vodom. To je kratki spoj. Pod djelovanjem faznog napona odgova-



Slika 63. Jednofazni kratki spoj u mreži, u kojoj je upotrebljeno nulovanje

rajuće faze teći će struja kratkog spoja i očekujemo, da će glavni osigurač odgovarajućeg faznog vodiča pregorjeti. To će se u većini slučajeva zaista i dogoditi. U izuzetnim slučajevima, međutim, ne će pregorjeti, naime tada, kad struja kratkog spoja bude manja od struje iskapčanja osigurača I_0. Pokušajmo odrediti kada će nastupiti takav slučaj! Zadovoljit ćemo se pretpostavkom da je napon napajanja naše mreže stalan, to jest da se ne mijenja s opterećenjem i da će zadržati svoju veličinu čak i u slučaju najvećeg trenutačnog opterećenja, to jest kod kratkog spoja. Uzmimo, nadalje, da imamo vodič dužine l (m), presjeka S (mm²) i specifičnog otpora ρ (Ω mm²/m). Ako fazni i neutralni vodič imaju jednaki presjek, omski otpor jedne zamke bit će

$$R = \frac{2 \cdot l \cdot \rho}{S}\ \Omega.$$

Induktivni otpor ima za sve presjeke približno istu vrijednost, a kod ravnih vodiča jedne zamke dužine l metara približno

$$X \simeq 0{,}6 \cdot l \cdot 10^{-3}\ \Omega$$

te je, prema tome, prividni otpor zamke

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \frac{2 \cdot l \cdot \rho}{S}\sqrt{1 + 9 \cdot \frac{S^2}{\varrho^2} \cdot 10^{-8}}.$$

Odnos između prividnog i omskog otpora iznosi približno

$$\xi = \frac{Z}{R} \simeq \sqrt{1 + 9 \cdot \frac{S^2}{\varrho^2} \cdot 10^{-8}}.$$

Za bakar ($\rho_{cu} = 0{,}0175$) dobijemo

$$\xi_{cu} \simeq \sqrt{1 + 0{,}0003 \cdot S^2}$$

i ta vrijednost u ovisnosti o presjeku prikazana je na sl. 64.

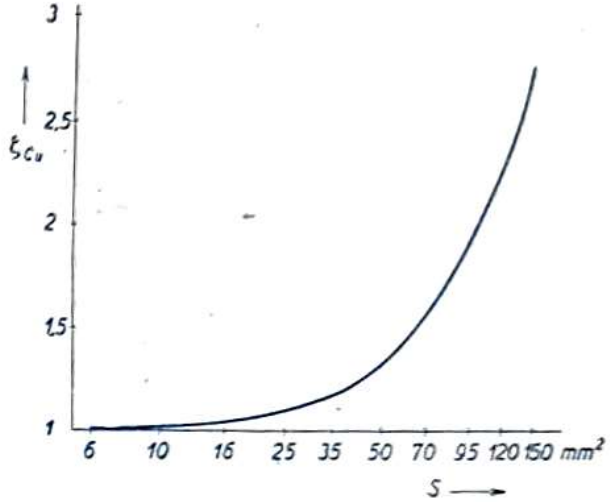
Na isti način dobit ćemo za aluminij ($\varrho_{Al} = 0{,}03$)

$$\xi_{Al} \simeq \sqrt{1 + 0{,}0001 \cdot S^2}.$$

Ta ovisnost prikazana je na sl. 65.

Kod kabela je najbolje da računamo sa stvarnim induktivnim otporima. Induktivni otpor može se približno odrediti pomoću izraza

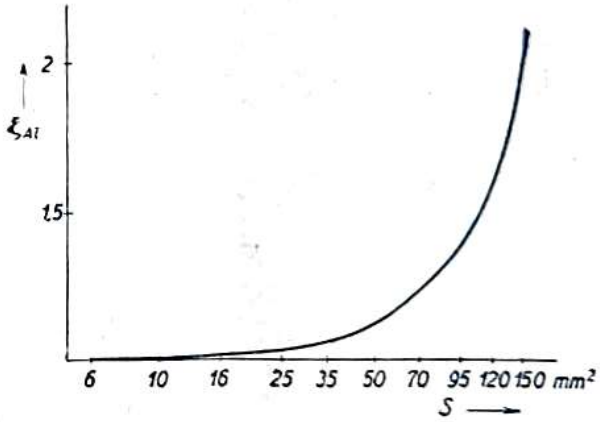
$$X \simeq 0{,}15 \cdot l \cdot 10^{-3}\ \Omega.$$



Slika 64. Odnos između prividnog i omskog otpora bakrenog vodiča kod dalekovoda u ovisnosti o presjeku

Kod jednofaznog kratkog spoja na kraju ravnog zračnog voda teći će trajna struja kratkog spoja

$$I_k = \frac{U_f}{Z} \simeq \frac{U_f \cdot S}{2 \cdot l \cdot \rho \cdot \sqrt{1 + 9 \cdot \frac{S^2}{\varrho^2} \cdot 10^{-8}}} = \frac{U_f \cdot S}{2 \cdot l \cdot \rho \cdot \xi}.$$



Slika 65. Odnos izmjeničnog i omskog otpora vodiča od aluminija kod dalekovoda u ovisnosti o presjeku

Ako uzmemo u obzir tabelu dopuštenih opterećenja vodova, i za pojedine presjeke dopuštenu nazivnu jačinu osigurača, i k tome činjenicu, da osigurač sigurno iskapča istom kod 2,5 puta veće struje od nazivne, možemo izraziti ovisnost struje iskapčanja osigurača o presjeku vodiča dovoljno točno

$$I_o \simeq 20 \cdot S^{2/3}.$$

To vrijedi ustvari samo za izolirane vodiče, ali možemo primijeniti i na gole vodiče, koje u većini slučajeva ne opterećujemo u većoj mjeri, kao izolirane.

Struja I_k kratkog spoja mora biti veća od struje iskapčanja osigurača I_o na početku faznog vodiča, ako osigurač treba da isklopi, to jest

$$I_k > I_o$$

ili

$$\frac{U_f \cdot S}{2 \cdot l \cdot \varrho \cdot \sqrt{1 + 9 \cdot \frac{S^2}{\varrho^2} \cdot 10^{-8}}} > 20 \cdot S^{2/3}$$

i smije kod datog napona i datog presjeka dužina voda biti najviše

$$l \leqq \frac{U_f \cdot S^{1/3}}{40 \cdot \varrho \cdot \sqrt{1 + 9 \cdot \frac{S^2}{\varrho^2} \cdot 10^{-8}}},$$

odnosno, kod bakrenih vodiča zaokruženo

$$l \leqq \frac{1{,}4 \cdot U_f \cdot S^{1/3}}{\sqrt{1 + 0{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot S^2}}.$$

Tu ovisnost za uobičajeni napon 380/220 V prikazuje crtkana krivulja A u dijagramu na sl. 66.

Kod kablova dobijemo odgovarajući izraz

$$l \leqq \frac{U_f \cdot S^{1/3}}{40\, \varrho \sqrt{1 + 5{,}6 \cdot \frac{S^2}{\varrho^2} \cdot 10^{-9} \cdot S^2}}$$

odnosno, kod bakrenih vodiča

$$l \leqq \frac{1{,}4 \cdot U_f \cdot S^{1/3}}{\sqrt{1 + 18{,}4 \cdot 10^{-6}\, S^2}}.$$

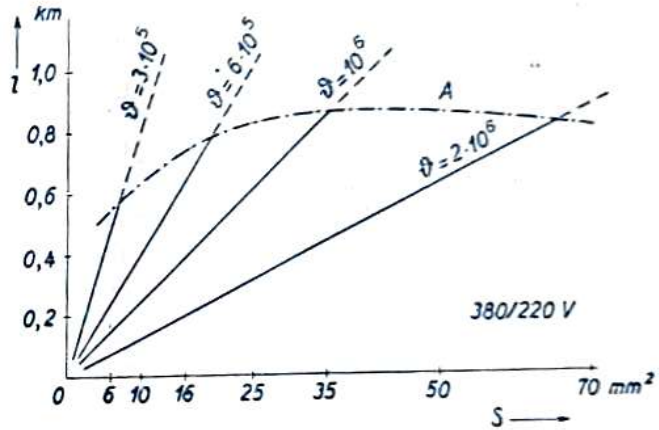
Uzmimo, na primjer kontinuirano opterećeni vodič, kojega je prenosna dužina l (m) data ukupnim opterećenjem P (W) i presjekom S (mm²) kod faktora snage $\cos \varphi$ i dopuštenog gubitka snage $v = 100$ u %, prema izrazu

$$l = \frac{3 \cdot v \cdot S \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi}{P \cdot \varrho}.$$

Za određene vrijednosti

$$\vartheta = \frac{P}{v \cdot \cos^2 \varphi}$$

i bakrene vodiče, predstavljaju te prenosne dužine u našem dijagramu na sl. 66. dužine, koje sve prolaze kroz početak koordinantnog sistema. Ako naš prijašnji uslov treba da bude ispunjen, kod

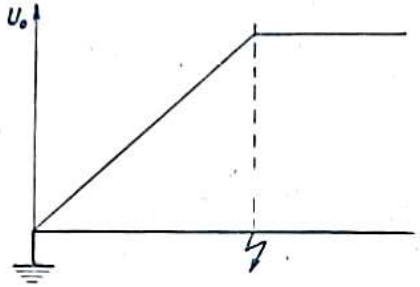


Slika 66. Dozvoljene prenosne dužine bakrenih vodiča u ovisnosti o presjeku obzirom na iskapčanje kod jednofaznog kratkog spoja, kod kontinuirano opterećenih trofaznih vodova

kojega će osigurač iskopčati u slučaju jednofaznog kratkog spoja, moraju dužine voda ležati u području ispod krivulje A našeg dijagrama, to jest u području puno iscrtanih linija. Vidimo da će vodiči biti predugi, obzirom na naš prijašnji zahtjev, samo u slučaju vrlo malo opterećenih vodova (ϑ je malen) i to prije svega kod najmanjih presjeka do 16 mm². Ako nemamo nepromjenljiv napon napajanja, prilike su, razumije se, manje povoljne, pa dužina vodova mora biti u odgovarajućoj mjeri manja, da bi naš zahtjev

bio ispunjen. Ako bismo uzeli vod opterećen na kraju, slika bi bila manje povoljna, jer iz prijašnjeg izraza za dužinu voda ispada faktor 3.

Očito je, da osigurač faznog vodiča ne će iskopčati u svakom slučaju. Pogledajmo, dakle, što će se dogoditi ako osigurač ne iskopča!



Slika 67. Raspodjela potencijala uzduž neutralnog vodiča kod jednofaznog kratkog spoja

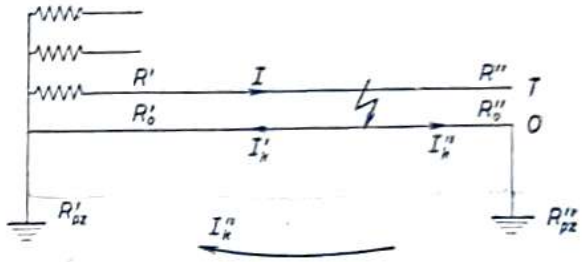
Na mjestu kratkog spoja nemamo napona između neutralnog vodiča i odgovarajućeg faznog vodiča i čitav fazni napon troši se u oba vodiča razmjerno prema njihovim otporima. Kod faznog napona 220 V otpada, dakle, na neutralni vodič 110 V, ako su presjeci obaju vodiča jednaki, odnosno 146 V, ako neutralni vodič ima polovinu presjeka faznih vodiča. Budući da je početak neutralnog vodiča u električnoj centrali, odnosno u transformatorskoj stanici uzemljen, ima na tom mjestu potencijal zemlje, a uzduž vodiča potencijal raste jednakomjerno do prije navedene najveće vrijednosti na mjestu kvara; iza njega ostaje konstantan sve do kraja vodiča, kako je prikazano na sl. 67.

Prema tome, zaštitna kućišta svih nulovanih trošila dobit će također napon prema zemlji i to tim veći, što su bliži mjestu kratkog spoja. Neki mogu dobiti i opasni napon. Zbog toga moramo tražiti, da osigurač faznog vodiča u slučaju kratkog spoja mora iskopčati na kraju vodiča. Gdje taj zahtjev nije ispunjen, možemo pomoći sebi na razne načine.

U prvom redu možemo vodič osigurati slabijim osiguračem, nego što bi bio dovoljan obzirom na presjek vodiča. Osigurač, međutim, mora biti toliko jak, da izdrži najveće nastupajuće opterećenje i vrške struje pokretanja.

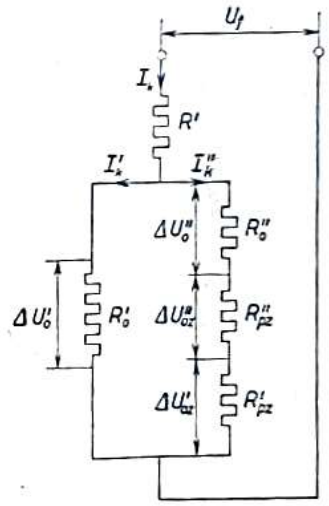
Kod razmjerno malo opterećenih i dugih vodiča taj način osiguranja sa slabijim osiguračem bit će vrlo često izvodljiv. Dalje, možemo pomoći sebi još i na taj način, da vod razdijelimo na dijelove, koje osiguravamo prema opterećenju postepeno, što dalje to

slabijim osiguračem, čak i u slučaju da vodič ima po cijeloj dužini jednak presjek. Možemo još pomoći sebi i na taj način, što ćemo neutralni vodič uzemljiti ne samo na početku, nego i na njegovom kraju. Tada će neutralni vodič dobiti manje napone prema zemlji, o čemu ćemo se, na osnovi onoga što ćemo navesti, uvjeriti.



Slika 68. Jednofazni kratki spoj s neutralnim vodičem, uzemljenim na početku i na kraju

Prema sl. 68. neutralni je vodič uzemljen na početku i na kraju s pogonskim uzemljenjem s prelaznim otporom R_{pz}', odnosno R_{pz}''. Sa R' i R'', odnosno R_0' i R_0'', označujemo dijelove otpora faznog, odnosno neutralnog vodiča od mjesta kvara do početka, odnosno do kraja vodiča.



Slika 69. Nadomjesna shema spoja otpora prema sl. 68

Kod jednofaznog kratkog spoja između faznog i neutralnog vodiča teći će, pod djelovanjem faznog napona, struja kratkog spoja najprije kroz fazni vodič do mjesta kvara, gdje se razdvaja na dvije grane, tako da dalje teče djelomično kroz neutralni vodič neposredno natrag do zvjezdišta, a djelomično kroz neutralni vodič

naprijed i kroz oba pogonska uzemljenja opet do zvjezdišta, kako je prikazano na nadomjesnoj shemi spoja na sl. 69. Ako uzimamo u račun samo omske otpore, ukupni otpor toga strujnog kruga bit će

$$R = R' + \frac{1}{\frac{1}{R_o'} + \frac{1}{R_o'' + R_{pz}' + R_{pz}''}}.$$

Induktivni otpor faznog i nultog vodiča možemo u našem računu zanemariti, jer pretpostavljamo razmjerno male presjeke vodiča do 16 mm², a najviše 25 mm². Već smo ustanovili, da je kod tih presjeka utjecaj induktivnog otpora malen (vidi sl. 64 i 65). Kod većih presjeka je, prema prijašnjim izlaganjima, jačina struje kratkog spoja ionako toliko velika, da osigurači na početku vodiča sigurno pregaraju.

Ako sada označimo sa

$$R_{pz} = R_{pz}' + R_{pz}''$$

zbir prelaznih otpora oba pogonska uzemljenja, a sa

$$R_o = R_o' + R_o''$$

ukupni otpor neutralnog vodiča, naš prijašnji izraz će se pojednostavniti u

$$R = R' + \frac{R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}{R_o + R_{pz}} =$$

$$= \frac{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}{R_o + R_{pz}}.$$

Struja kratkog spoja je, dakle

$$I_k = \frac{U_f}{R} = U_f \cdot \frac{R_o + R_{pz}}{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}.$$

Od mjesta kvara do zvjezdišta nastaje u obje usporedne grane pad napona

$$\Delta U_o' = I_k \cdot \frac{R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}{R_o + R_{pz}} =$$

$$= U_f \cdot \frac{R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}.$$

Pri tome teče kroz neutralni vodič od mjesta kvara do zvjezdišta struja

$$I_k' = \frac{\Delta U_o'}{R_o'} = I_k \cdot \frac{R_o'' + R_{pz}}{R_o + R_{pz}} =$$

$$= U_f \cdot \frac{R_o' \cdot R_o''}{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}.$$

U drugoj grani s prelaznim otporima oba uzemljenja teče struja

$$I_k'' = \frac{\Delta U_o'}{R_o'' + R_{pz}} = I_k \cdot \frac{R_o'}{R_o + R_{pz}} =$$

$$= U_f \cdot \frac{R_o'}{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})},$$

koja prouzrokuje u drugom dijelu neutralnog vodiča pad napona

$$\Delta U_o'' = I_k \cdot R_o'' = U_f \cdot \frac{R_o' \cdot R_o''}{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}.$$

U pogonskom uzemljenju na početku voda prouzrokuje pad napona

$$\Delta U_{pz}' = I_k'' \cdot R_{pz}' = I_k \cdot \frac{R_o' \cdot R_{pz}'}{R_o + R_{pz}} =$$

$$= U_f \cdot \frac{R_o' \cdot R_{pz}'}{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})},$$

odnosno, u uzemljenju na kraju voda

$$\Delta U_{pz}'' = I''_k \cdot R_{pz}'' = I_k \cdot \frac{R_o' \cdot R_{pz}''}{R_o + R_{pz}} =$$

$$= U_f \cdot \frac{R_o' \cdot R_{pz}''}{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}.$$

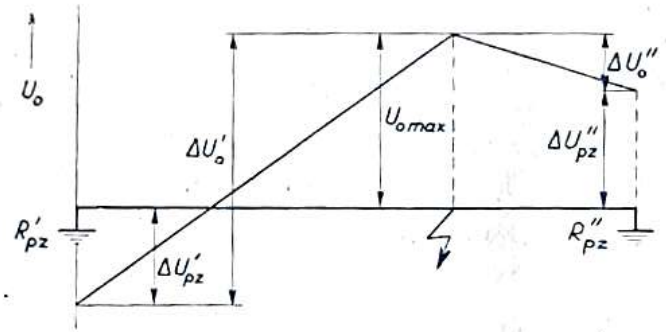
To je napon zvjezdišta prema zemlji. Neutralni vodič dobit će najveći napon prema zemlji na mjestu kvara, naime

$$U_{o\,max} = \Delta U_o' - \Delta U_{pz}' = I_k \cdot \frac{R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz}'')}{R_o + R_{pz}} =$$

$$= U_f \cdot \frac{R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz}'')}{R' \cdot (R_o + R_{pz}) + R_o' \cdot (R_o'' + R_{pz})}.$$

Taj napon je tim veći, što se kvar nalazi bliže početku voda. Za određene uslove na sl. 70. prikazana je raspodjela potencijala uzduž neutralnog vodiča kod jednofaznog kratkog spoja. Vidimo, da neutralni vodič na mjestu kratkog spoja ima najveći potencijal prema zemlji, koji prema zvjezdištu opada do skoro podjednakog potencijala suprotnog smisla.

Ukupni pad napona u neutralnom vodiču, od mjesta kratkog spoja do zvjezdišta, nešto je manji nego je bio u prijašnjem slučaju, kad je neutralni vodič bio uzemljen samo na početku, jer kroz usporednu granu teče manji dio struje kratkog spoja naprijed po neutralnom vodiču do njegovog kraja i preko oba pogonska uzemljenja. U tim uzemljenjima nastaje pad napona, razmjeran



Slika 70. Primjer raspodjele napona prema zemlji uzduž neutralnog vodiča, uzemljenog na početku i na kraju, kod jednofaznog kratkog spoja

njihovim prelaznim otporima. Budući da kroz njih teče struja suprotnog smjera, zvjezdište dobiva potencijal smisla suprotnog potencijalu neutralnog vodiča na mjestu kratkog spoja. Zato je najveći potencijal neutralnog vodiča znatno manji nego u prijašnjem primjeru. U većini slučajeva dostigne samo 20 do 40% faznog napona; razumije se da je to veći, što je presjek neutralnog vodiča manji. Da bi neutralni vodič dobio što je moguće manji napon prema zemlji, bilo bi ustvari najbolje da mu dademo veći presjek nego što su presjeci faznih vodiča, ali je to, obzirom na ostale zahtjeve, sasvim nepotrebno i zbog toga neuporedivo skuplje rješenje. Ne smijemo se protiviti zahtjevu, da neutralni vodič ima presjek jednak presjeku faznih vodiča. Prema tome, najveći napon neutralnog vodiča prema zemlji je

$$U_{o\,max} = U_f \cdot \frac{R_o'' + R_{pz}''}{R_o + R_o'' + 2 \cdot R_{pz}}.$$

Zvjezdište će dobiti napon prema zemlji

$$\Delta U_{pz}' = U_f \cdot \frac{R_{pz}'}{R_o + R_o'' + 2 \cdot R_{pz}}.$$

Pokušajmo na osnovi izloženoga odrediti da li je i pod kakvim uslovima moguće, da neutralni vodič ne dobije opasni napon prema zemlji.

Prije svega vidimo, da pogonsko uzemljenje na kraju neutralnog vodiča treba da ima po mogućnosti jednako mali prelazni otpor kao i uzemljenje na početku voda, budući da je najveći napon neutralnog vodiča prema zemlji veći, što je prelazni otpor pogonskog uzemljenja na kraju voda veći, kod istog ukupnog prelaznog otpora oba uzemljenja.

Za daljnji račun postavit ćemo da je

$$R_o' = \alpha \cdot R_o$$
$$R_o'' = (1 - \alpha) \cdot R_o$$
$$R_{pz}' = \beta \cdot R_o$$
$$R_{pz}'' = \gamma \cdot R_o.$$

Tako možemo naš prijašnji izraz pisati u obliku

$$\frac{U_{o\,max}}{U_f} = \frac{1 - \alpha + \gamma}{2 - \alpha + 2 \cdot (\beta + \gamma)}.$$

Budući da se radi o vodiču konstantnog presjeka, α je istovremeno mjerilo za udaljenost mjesta kvara od početka voda. Ako u posebnom slučaju pogonsko uzemljenje na početku i na kraju voda ima jednaki prelazni otpor ($\beta = \gamma$), zadnji izraz se pojednostavnjuje u

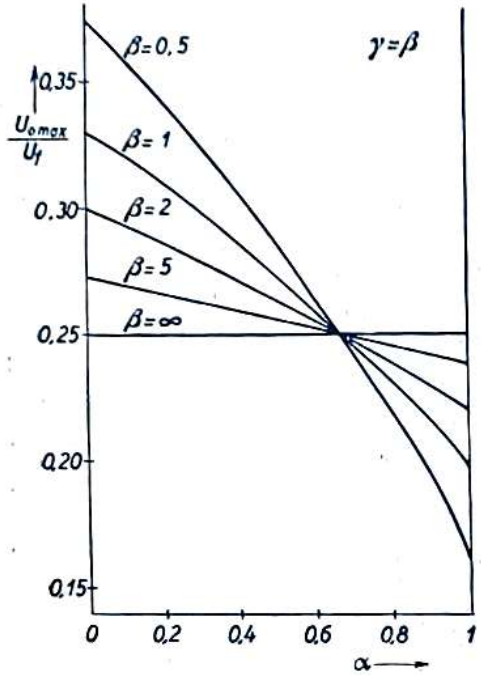
$$\frac{U_{o\,max}}{U_f} = \frac{1 - \alpha + \beta}{2 - \alpha + 4\beta}.$$

Vrijednosti toga razmjera date su na dijagramu na sl. 71. Računamo s time, da neutralni vodič ima najveći otpor nekih 4 Ω, pogonsko uzemljenje od 1 . . . 4 Ω, tako da je obično $0{,}5 < \beta < 30$.

Tu moramo voditi računa još i o tome, da fazni vodiči dobivaju veći napon prema zemlji, ako zvjezdište dobije napon prema njoj. Općenito vrijedi pravilo, da fazni vodiči u razvodnim mrežama smiju imati napon do 250 V prema zemlji. Ovu granicu dosežemo, ako zvjezdište ima prema zemlji napon 52,5 V, o čemu se možemo računski osvjedočiti. Ako, dakle, dopustimo toliki napon

neutralnog vodiča prema zemlji, bit će ispunjen još i zahtjev, da fazni vodiči ne smiju dobiti prema zemlji napon veći od 250 V.

Iz prijašnjega općenitog obrasca i iz dijagrama slijedi da je napon neutralnog vodiča prema zemlji to veći, što je kvar bliži početku vodiča. Zato smijemo očekivati da neutralni vodič ne će



Slika 71. Razmjer najvećeg napona neutralnog vodiča prema zemlji i faznog napona za razne vrijednosti u ovisnosti od mjesta kvara

kod kratkog spoja u zadnjem dijelu dobiti opasni napon prema zemlji.

Taj opseg dat je općenito vrijednošću

$$\alpha > \frac{U_f - 2 \cdot U_{o\,max} + U_f \cdot \gamma - 2 \cdot (\beta + \gamma) \cdot U_{o\,max}}{U_f - U_{o\,max}}$$

ako za U_0 uvrstimo maksimalni napon, koji hoćemo da dozvolimo, na primjer 50 V. Vidimo, da prelazni otpor pogonskih uzemljenja na početku i na kraju voda u određenom primjeru nema nikakav utjecaj na veličinu vrijednosti α, to jest, ako je

$$U_f \cdot \gamma - 2 \cdot (\beta + \gamma) \cdot U_{o\,max} = 0,$$

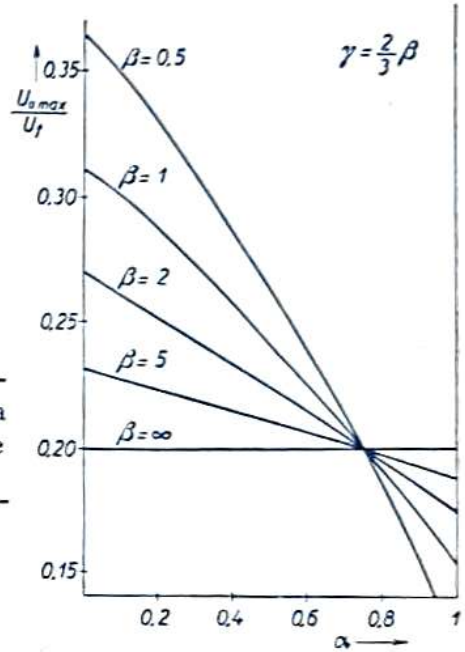
što odgovara najvećem naponu neutralnog vodiča prema zemlji

$$U_{o\,max} = \frac{\gamma \cdot U_f}{2 \cdot (\beta + \gamma)}.$$

Budući da, prema prijašnjem, pogonsko uzemljenje na kraju voda treba da bude isto tako dobro kao i na početku voda, izjednačimo opet prelazne otpore oba pogonska uzemljenja ($\beta = \gamma$) i tako dobijemo

$$U_{o\,max} = \frac{U_f}{4},$$

što daje za obični trofazni sistem s faznim naponom 220 V najveći napon neutralnog vodiča prema zemlji, veličine 55 V, koji se još može smatrati dozvoljenim.



Slika 72. Razmjer najvećeg napona neutralnog vodiča prema zemlji i faznog napona za razne vrijednosti β i $\gamma = \frac{3}{2}\beta$ u ovisnomjestu kvara

Kod te granice opasnog napona i kod pogonskog napona 380/220 V dobit će naš prijašnji izraz oblik

$$\alpha > \frac{2}{3} \cdot (1 - \beta + \gamma).$$

U tom području neutralni vodič ne dobiva opasni napon. Ako su prelazni otpori pogonskog uzemljenja na početku i na kraju voda jednaki ($\beta = \gamma$), onda je

$$\alpha > \frac{2}{3}$$

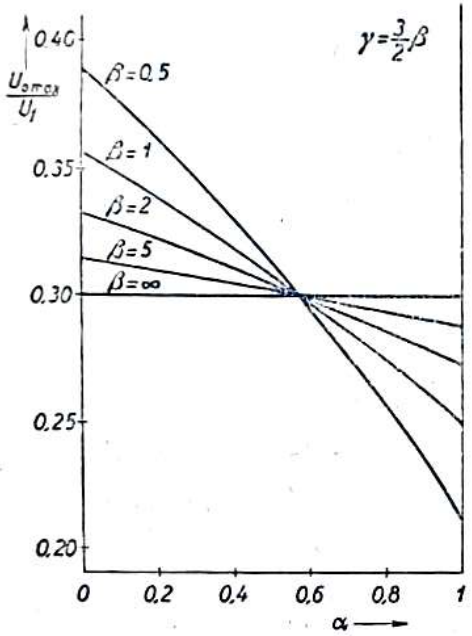
što znači, da neutralni vodič ne dobiva opasni napon prema zemlji, ako imamo jednofazni kratki spoj na zadnjoj trećini njegove dužine. Što je manji prelazni otpor pogonskog uzemljenja na kraju voda prema prelaznom otporu pogonskog uzemljenja na početku voda ($\gamma < \beta$), to veći dio neutralnog vodiča ne dobiva opasni napon prema zemlji. To prikazuju i sl. 72. i 73.

Kod prvog dijagrama na sl. 72. pretpostavljamo da je prelazni otpor pogonskog uzemljenja kraju voda manji

($\gamma = \frac{2}{3} \cdot \beta$), kod drugog dijagrama na sl. 73. je veći ($\gamma = \frac{3}{2} \beta$)

od prelaznog otpora pogonskog uzemljenja na početku voda.

Tako bismo ustvari morali tražiti da prelazni otpor pogonskog uzemljenja na kraju voda bude znatno manji od prelaznog otpora pogonskog uzemljenja na početku voda. Međutim i u tom su slučaju određene granice, jer inače zvjezdište dobija previsoki napon prema zemlji.



Slika 73. Odnosi najvećeg napona neutralnog vodiča prema zemlji i faznog napona za razne vrijednosti β i $\gamma = \frac{2}{3}\beta$ u ovisnosti od mjesta kvara (α)

Razmjer napona zvjezdišta prema zemlji i faznog napona možemo izraziti za opći slučaj slijedećim oblikom

$$\frac{\Delta U_{pz}}{U_f} = \frac{\beta}{2 - \alpha + 2 \cdot (\beta + \gamma)}.$$

Ako opet dopustimo 55 V prema zemlji, kod napona 380/220 V mora vrijediti da je

$$0{,}25 > \frac{\beta}{2 - \alpha + 2 \cdot (\beta + \gamma)}.$$

Tu moramo uvrstiti $\alpha = 1$, jer napon je zvjezdišta prema zemlji tada najveći. Tako dobijemo drugi uslov, da mora biti

$$\gamma > \beta - \frac{1}{2}$$

pored kojega mora istovremeno vrijediti još i prvi uslov

$$\alpha > \frac{2}{3} \cdot (1 - \beta + \gamma).$$

Oba ta uslova možemo združiti u oblik

$$\beta - \frac{1}{2} < \gamma < \frac{3}{2} \cdot \alpha + \beta - 1.$$

Ako hoćemo, na primjer, postići da ne dobijemo opasnih napona neutralnog vodiča prema zemlji, ako nastane jednofazni kratki spoj na zadnjoj trećini voda, mora biti $\alpha = {}^2/_3$ i

$$\beta - \frac{1}{2} < \gamma < \beta.$$

Prema svemu tome vidimo, da bi bilo moguće postići da neutralni vodič ne dobije napon prema zemlji veći od 55 V, ako imamo jednofazni kratki spoj na zadnjoj trećini voda, ali pod vrlo teškim uvjetom, kojega praktički skoro nikada ne možemo ispuniti: prelazni otpor pogonskog uzemljenja na kraju voda morao bi imati uvijek točno određenu veličinu, čije su granice vrlo usko određene. To, međutim, u praksi nije izvodljivo još i zbog toga, jer se prelazni otpor uzemljivača vremenom mijenja.

Te granice, međutim, postaju znatno šire, ako dozvolimo nešto veći napon neutralnog vodiča prema zemlji. Neki misle, da naponi do 65 V nisu opasni. Ako uzmemo 66 V, odgovara to razmjeru

$$\frac{U_{0\,max}}{U_f} = \frac{3}{10}.$$

pa je, dakle, dozvoljeno područje prelaznog otpora pogonskog uzemljenja na kraju voda dato sa

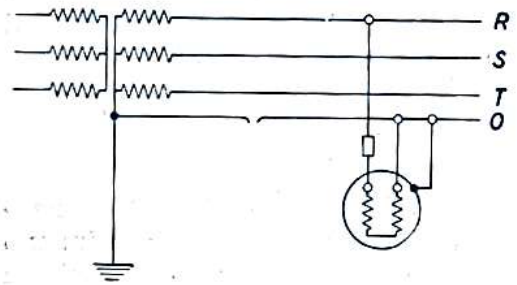
$$\frac{2}{3} \cdot \beta - \frac{1}{2} < \gamma < \frac{7}{4} \cdot \alpha + \frac{3}{2} \cdot \beta - 1.$$

To područje već je toliko široko, da možemo lako ispuniti gornje zahtjeve. Tako dobivamo, na primjer

$$\frac{2}{3} \cdot \beta - \frac{1}{2} < \gamma < \frac{3}{2} \cdot \beta + \frac{1}{6} \qquad \text{kod } \alpha = \frac{2}{3}$$

Prema svemu tome dolazimo do slijedećeg zaključka:

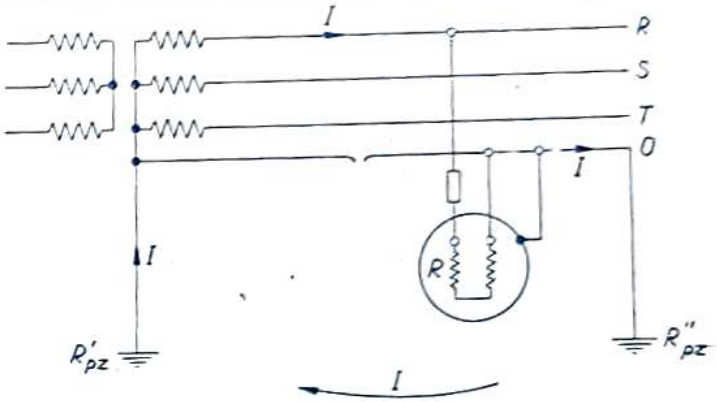
Ako uzemljimo neutralni vodič ne samo na početku voda, nego i na njegovom kraju, i ako je prelazni otpor pogonskog uzemljenja na kraju voda isto tako dobar, kao što je prelazni otpor pogonskog uzemljenja na početku voda, tada općenito možemo očekivati, da neutralni vodič po svoj svojoj dužini ne će dobiti opasni napon prema zemlji u slučaju jednofaznog kratkog spoja na zadnjoj trećini voda. Istovremeno se moramo pobrinuti i za to, da osigurač pouzdano iskopča, kada je mjesto kratkog spoja bliže početku voda.



Slika 74. Prekinuti neutralni vodič kod pogonskog uzemljenja na početku voda

Moramo, nadalje računati s još jednim mogućim kvarom. Što će se dogoditi, ako se neutralni vodič prekine? Prema sl. 74. neka je na mrežu priključeno jednofazno trošilo.

Kućište trošila vezano je s neutralnim vodičem uzemljenim samo u centrali i prekinutim ispred toga trošila. U krajnjem slučaju na taj dio mreže priključeno je samo to jednofazno trošilo, kroz kojega u tom slučaju ne može teći struja, jer za nju nema zatvorenog strujnog kruga. Preko njegovog namotaja dobit će neutralni vodič čitavi fazni napon. Ako je pak na taj dio mreže priključeno više jednofaznih trošila na sve tri faze, tada će neutralni vodič dobiti potencijal umjetnog zvjezdišta, koje je određeno otporima trošila na pojedinim fazama. Na svaki način neutralni vodič može lako dobiti opasno veliki napon prema zemlji, što ne smijemo dopustiti. Kod kabelskih mreža neutralni je vodič dobro zaštićen i ne trebamo se bojati, da će se prekinuti. Kod zračnih vodova, međutim, to je prije moguće. Budući da ćemo, u smislu prijašnjih izlaganja, uzemljiti neutralni vodič na početku i na kraju voda, mora prema sl. 75. teći struja I preko prekinutog dijela neutralnog vodiča i preko oba uzemljenja k zvjezdištu i zbog toga će oba dijela neutralnog vodiča dobiti napon prema zemlji.



Slika 75. Prekinuti neutralni vodič kod dvostrukog pogonskog uzemljenja neutralnog vodiča

Fazni napon U_f troši se u otporu R jednofaznog trošila i u oba prelazna otpora R_{pz}' i R_{pz}'' pogonskih uzemljenja, tako da je

$$U_f = I \cdot (R + R_{pz}' + R_{pz}'').$$

Kod toga će oba dijela prekinutog neutralnog vodiča dobiti napon prema zemlji i to dio kod zvjezdišta

$$U_0' = I \cdot R_{pz}',$$

a prekinuti dio

$$U_0'' = I \cdot R_{pz}''.$$

Budući da moramo, prema ranijim izlaganjima, zahtijevati da pogonsko uzemljenje zvjezdišta ima prelazni otpor $R_{pz}' \leqq 1{,}5\ \Omega$ i da je potrebno da i pogonsko uzemljenje na kraju voda bude isto tako dobro, onda je

$$U_0 = U_0' = U_0'' \leqq 1{,}5 \cdot I.$$

Iz prve i zadnje jednadžbe slijedi, da otpor jednofaznog trošila mora biti barem

$$R \geqq \frac{1{,}5 \cdot U_f}{U_0} - 3,$$

odnosno, njegova snaga smije biti najviše

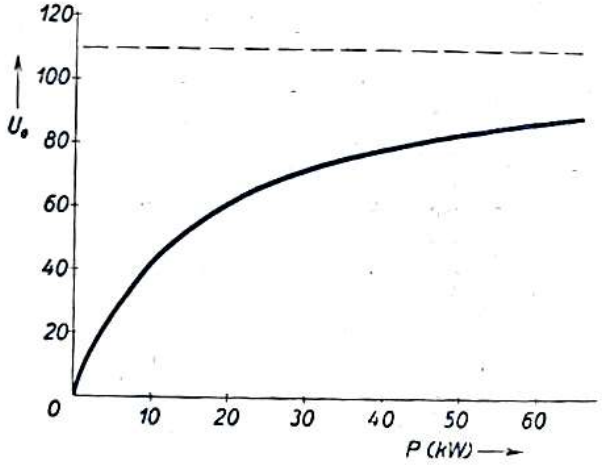
$$P \leq \frac{U_f^2}{\frac{1{,}5 \cdot U_f}{U_0} - 3},$$

gdje je snaga navedena u vatima. Ta snaga istovremeno odgovara najvećem jednofaznom preopterećenju kod simetrično opterećenih faza. To prikazuje i dijagram na sl. 76., na kojem su navedeni naponi prekinutog neutralnog vodiča kod napona 380/220 V, ako pogonska uzemljenja imaju prelazni otpor po 1,5 Ω.

Napon 55 V doseže se kod snage

$$P = \frac{220^2}{\frac{1{,}5 \cdot 220}{55} - 3} = 16\,500 \text{ W} \cong 16 \text{ kW}.$$

Taj napon raste s rastućom snagom trošila razmjerno polako i doseže, na primjer, kod 23 kW vrijednost 75 V, koju eventualno možemo još dopustiti. Na svaki način je napon neutralnog vodiča



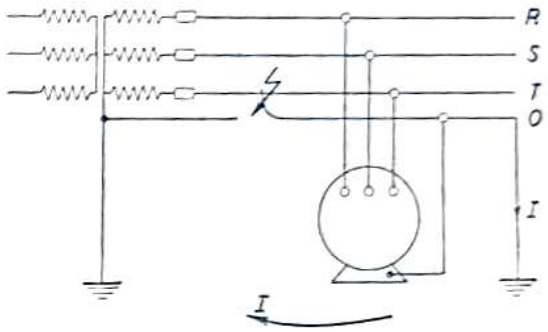
Slika 76. Ovisnost napona prekinutog neutralnoga vodiča o najvećem jednofaznom preopterećenju kod napona 380/220 V, ako pogonska uzemljenja imaju prelazni otpor $R_{pz}' = R_{pz}'' = 1{,}5\ \Omega$

prema zemlji, u svim praktičnim slučajevima, znatno manji od 110 V, to jest od polovine faznog napona.

U praksi, razumije se, ne možemo propisati jednofazna opterećenja, odnosno preopterećenja. Zato se ne smijemo osloniti na to, da jednofazno opterećenje ne će prekoračiti tu granicu, kod koje će neutralni vodič dobiti nedozvoljeno veliki napon prema zemlji.

Naš praktični zahtjev je, dakle, da neutralni vodič moramo polagati isto tako dobro i isto tako pažljivo kao i fazne vodiče, tako da se neutralni vodič vjerojatno ne će prekinuti. Kabelske mreže u tom su pogledu najsigurnije.

Ponekad se dogodi da prekinuti dio neutralnog vodiča dobije još i spoj s nekim od faznih vodiča, prema sl. 77. To je, prije svega, moguće tada, kad je neutralni vodič položen iznad faznog vodiča. Prekinuti dio neutralnog vodiča dobije tad puni fazni napon, ako je uzemljen samo na početku. Ako je, međutim, uzemljen



Slika 77. Spoj prekinutog neutralnoga vodiča s faznim vodičem

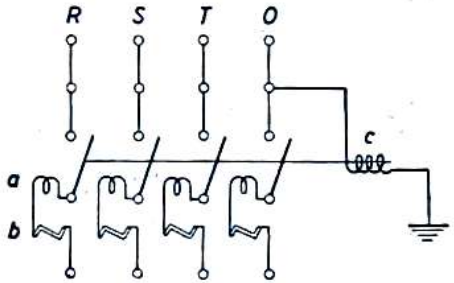
i na kraju, teći će struja kvara kroz fazni vodič dalje po neutralnom vodiču i kroz oba pogonska uzemljenja. Struja kvara bit će uvijek manja nego u slučaju jednofaznog kratkog spoja i osigurač u faznom vodiču u većini slučajeva ne će pregorjeti. Zato će oba dijela neutralnog vodiča dobiti napon prema zemlji, koji može biti i opasan. Jednako će dobiti napon prema zemlji i omotači svih nulovanih trošila. Taj napon je u većini slučajeva vrlo velik, jer je prelazni otpor svakog uzemljenja obično znatno veći od otpora vodiča.

Takav kvar ne smijemo dopustiti. Ako se neutralni vodič zračnog voda prekine, ne smije pasti na fazni vodič. To se ne će dogoditi, ako je položen ispod faznih vodiča.

Tako vidimo, da i nulovanje ima velike nedostatke. Upotrebljavati ga smijemo samo u slučajevima, kad neutralni vodič kod raznih pogonskih kvarova ne može dobiti prevelike napone prema zemlji. Prije svega, neutralni vodič mora imati presjek kao i fazni vodiči, dalje, mora biti jednako pažljivo položen, kao i fazni vodiči. Taj zahtjev je kod kabelskih mreža ionako ispunjen. Kod zračnih vodova mora biti položen ispod faznih vodiča. Osim toga, neutralni vodič mora biti uzemljen na početku i na kraju voda. Trebamo

biti oprezni kod dugih vodova, jer osigurač mora da isklopi kod jednofaznih kratkih spojeva, koji nastaju na velikim udaljenostima od početka voda. Zbog svega toga nulovanje upotrebljavamo prvenstveno u kabelskim mrežama velikih gradova i tvornica, a manje je prikladno u razgranatim razvodnim mrežama, koje su izvedene zračnim vodovima.

Napominjemo, da se pomoću posebnih automata može lako postići u centrali, odnosno u razvodnim stanicama mreže, da budu svi uslovi nulovanja uvijek ispunjeni. Takvi automatski prekidači iskapčaju pomoću okidača fazne vodiče i neutralni vodič istovremeno, kad u neutralnom vodiču teče prevelika struja, odnosno, kad on dobije nedozvoljeno veliki napon prema zemlji. Osim toga mogu, razumije se, imati i u fazama elektromagnetne i termičke okidače za iskapčanje kod kratkih spojeva i preopterećenja. (Sl. 78.) Slabost takvih automata je u tome, da kod eventualnih kvarova iskapčaju veliki dio mreže, pa tada svi veliki priključeni potrošači ostaju bez struje.



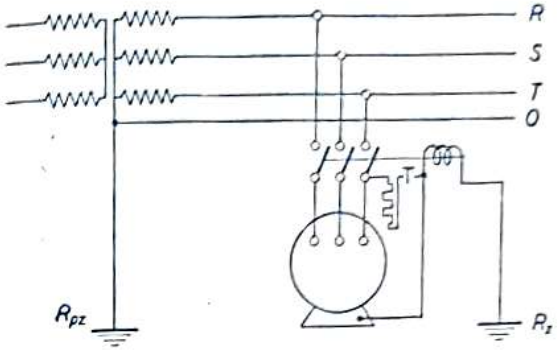
Slika 78. Spoj automata u mreži, u kojoj je izvedeno nulovanje (a = elektromagnetski okidač, b = termički okidač, c = naponski okidač)

Takve zaštitne sklopke upotrebljavamo zbog toga često radije za osiguranje pojedinih kuća, umjesto glavnih kućnih osigurača, kod čega dobiju u neutralnom vodiču samo naponski okidač.

8. NAPONSKI ZAŠTITNI SPOJ

Kod naponskog zaštitnog spoja upotrebljavamo poseban automat, koji automatski iskapča trošilo, netom na njemu nastane kvar na izolaciji. Vezu zaštitnog spoja automata prikazuje sl. 79. Omotač trošila vezan je sa zemljom preko posebnog svitka okidača za izbacivanje zaštitnog automata. Kod kvara na izolaciji teče struja kvara kroz pomenuti svitak okidača u zemlju i pod njenim djelovanjem

automat iskopča trošilo od mreže. Da možemo lako iskušati djelovanje automata, on ima još jednu tipku, kojom preko otpora priključujemo fazni napon na svitak za izbacivanje.



Slika 79. Naponski zaštitni spoj

Svitak za izbacivanje ima, razumije se, svoj omski otpor R_s i induktivni otpor $X_s = \omega \cdot L$. Ako još uračunamo i omski otpor R_z pomoćnog uzemljenja zaštitnog prekidača, najveća struja kvara data je sa

$$I_{k\,max} = \frac{U_f}{\sqrt{(R_s + R_z)^2 + X_s^2}},$$

jer prelazni otpor R_{pz} pogonskog uzemljenja, koji je vrlo malen, možemo zanemariti.

Zaštitni automat mora iskopčati također i u slučaju, kad je napon kvara U_k manji, da ne dobijamo opasne dodirne napone. Potrebno je, dakle, da automat iskopča kod struje kvara

$$I_k = \frac{U_k}{\sqrt{(R_s + R_z)^2 + X_s^2}} \geqq \frac{50}{\sqrt{(R_s + R_z)^2 + X_s^2}}.$$

Na svitak za izbacivanje otpada samo dio napona kvara, naime, u općem slučaju

$$U_s = I_k \cdot \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = U_k \cdot \frac{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{\sqrt{(R_s + R_z)^2 + X_s^2}}$$

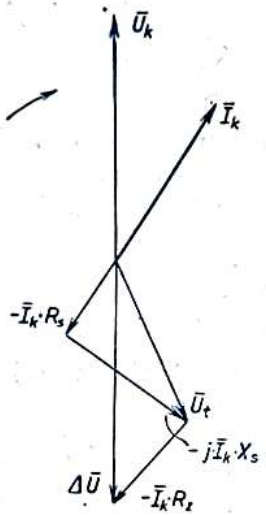
odnosno najviše

$$U_{s\,max} = U_f \cdot \frac{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{\sqrt{(R_s + R_z)^2 + X_s^2}}$$

u slučaju, kad kućište dobije neposredni spoj s fazom.

Vektorski dijagram zaštitnog spoja prikazuje sl. 80. Naponu kvara U_k mora držati ravnotežu ukupno pad napona ΔU u svim otporima.

Sastoji se od pada napona $-I_k \cdot R_s$ zbog omskog otpora svitka okidača, od pada napona $-j \cdot I_k \cdot X_s$ zbog induktivnog otpora svitka i od pada napona $-I_k \cdot R_z$ u omskom prelaznom otporu uzemljenja zaštitnog prekidača. U_s je pad napona u svitku za izbacivanje. Već iz toga dijagrama proizlazi, da prelazni otpor pomoćnog uzemljenja nema veliki utjecaj na veličinu struje kvara, ako nije znatno veći od omskog i induktivnog otpora svitka za izbacivanje.



Slika 80. Vektorski dijagram zaštitnog spoja

Svaki zaštitni automat načinjen je tako, da iskopča kod određene struje iskapčanje I_{is}. Njegov svitak za iskapčanje ima određeni omski i induktivni otpor. Zaštitni automat iskapča, dakle, kod napona iskapčanja U_{is}, koji mora biti manji od najvećeg dozvoljenog napona kvara ili najviše jednak njemu, prema tome

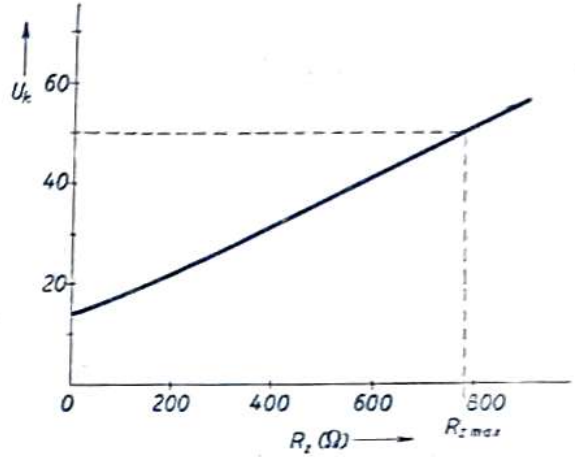
$$U_{is} = I_{is} \cdot \sqrt{(R_s + R_z)^2 + X_s^2} < U_k = 50.$$

Tako određujemo karakteristiku iskapčanja zaštitnog automata, koja prikazuje napon iskapčanja automata u ovisnosti o prelaznom otporu uzemljenja R_z. Karakteristika je nacrtana na sl. 81. za dati razmjer ($R_s = X_s = 200\ \Omega$, $I_{is} = 0{,}05$ A).

Vidimo odmah, da uzemljenje u tom slučaju može imati prelazni otpor skoro 800 Ω, ako zaštitna sklopka treba da isklopi kod

napona kvara ispod 50 V. To je i najveća prednost zaštitnog spoja, da ne trebamo dobro uzemljenje.

Prelazni otpor R_z uzemljenja zaštitne sklopke može biti razmjerno velik, na primjer više stotina oma. Takvo uzemljenje je u svakom slučaju jednostavno izvedivo, a nije ni skupo. Dopuštena je, na primjer, u zidu ugrađena mala metalna ploča ili žica. Moramo



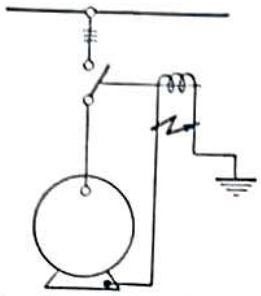
Slika 81. Napon iskapčanja zaštitnog automata u ovisnosti o prelaznom otporu pomoćnog uzemljenja

ipak nastojati dobiti prelazni otpor ispod 100 ili barem ispod 200 Ω. Razumije se također, da za pomoćno uzemljenje zaštitne sklopke možemo koristiti i bolji uzemljivač, a isto tako i vodovodnu mrežu, ali ovo posljednje samo uz neka ograničenja, koja ćemo kasnije navesti i obrazložiti.

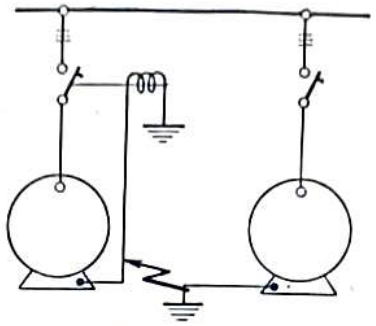
Zaštitna sklopka treba da isklopi uvijek u svim polovima, to jest sve fazne vodiče i neutralni vodič, jer se lako može dogoditi da ovaj posljednji dobije napon prema zemlji. Zaštitni spoj možemo upotrebiti u svim slučajevima, a posebno je preporučljiv za veća trošila, ako bismo imali poteškoće s izvođenjem dobrog uzemljenja ili s nulovanjem. Iako je princip zaštitnog spoja vrlo jednostavan, moramo voditi račun o mnogim pojedinostima, da bi zaštita bila doista djelotvorna.

Kod svakog pojedinog trošila treba paziti na to, da struja kvara teče od zaštitnog kućišta trošila doista kroz svitak za izbacivanje k pomoćnom uzemljenju. Ne smijemo dopustiti mogućnost da zaštitni vodič od zaštićenoga trošila do svitka okidača i vodič za uzemljenje od svitka za izbacivanje do pomoćnog uzemljenja dobiju neposrednu metalnu i prevodnu vezu, jer bi u tom slučaju

svitak okidača bio kratko spojen i kroz njega ne bi tekla dovoljno jaka struja iskapčanja (sl. 82). Zaštitna sklopka u tom slučaju ne bi iskopčala. Isto tako moramo se pobrinuti za to, da zaštitni vodič ne dobije napon kvara preko nekih drugih provodnih veza, zbog kvara na izolaciji na drugim električnim trošilima.

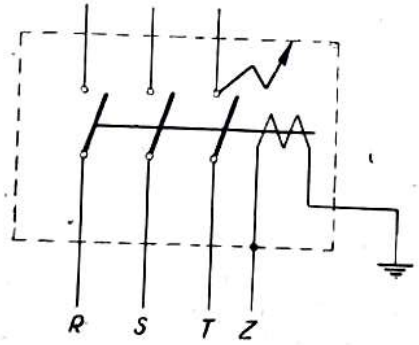


Slika 82. Kod spoja između zaštitnog vodiča i vodiča za uzemljenje zaštitni automat ne će isklopiti



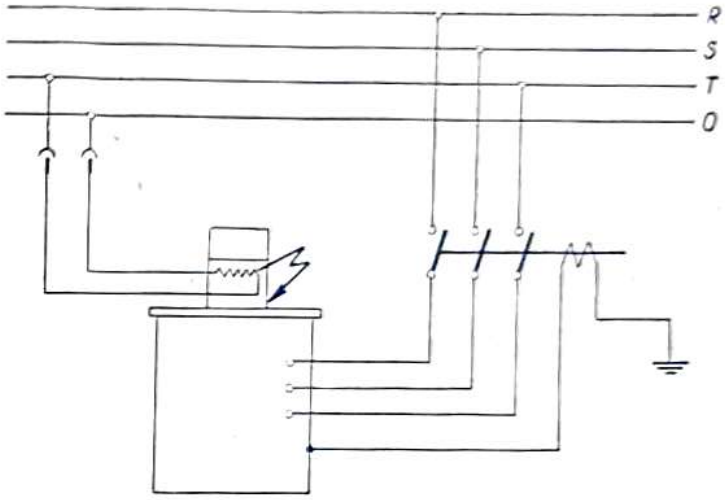
Slika 83. Zaštitni vodič mora biti izoliran

Zbog toga je potrebno, da zaštitni vodič bude izoliran od zaštitnog kućišta do spoja sa svitkom. Goli zaštitni vodič može dobiti napon od drugdje; tada struja kvara drugoga trošila teče kroz svitak okidača i zaštitna sklopka isklopi neoštećeno trošilo. To prikazuje sl. 83. Lijevi motor ima zaštitnu sklopku, a desni je samo uzemljen. Ako zaštitni vodič lijevoga motora nije izoliran i dođe na bilo koji način u vodljivu vezu s vodičem za uzemljenje desnoga motora, dobit će zaštitni vodič napon kod kvara na izolaciji desnoga motora. Zaštitna sklopka lijevoga motora će isklopiti. Njegov omotač ostat će pod naponom, u slučaju da uzemljenje desnoga motora nije pravilno izvedeno.



Slika 84. Kvar na izolaciji ispred naponske zaštitne sklopke

Važno je također, da metalno kućište zaštitne sklopke ne smije biti vezano sa svitkom okidača. Ako nastane, prema sl. 84., kvar na izolaciji dovoda, dakle ispred noževa prekidača, teći će struja kvara kroz svitak okidača i sklopka će isklopiti. Budući da je kvar ispred sklopke, teći će kroz svitak okidača još i dalje i svitak će pregorjeti. Nije, naime, dimenzioniran za trajnu struju. Takav izolacijski kvar može nastati i na dovodu, na primjer od vodiča do čelične cijevi. Ti nedostaci se lako izbjegnu na taj način, što će zaštitna sklopka imati kućište od izolacionog materijala.



Slika 85. Naponska zaštitna sklopka može iskopčati trošilo bez kvara na izolaciji

Isto tako ne smijemo upotrebljavati u blizini, na primjer, električnog štednjaka priključenog preko zaštitne sklopke, još i običnu utičnicu, na koju bi se moglo priključiti i električno kuhalo. Ako bi kuhalo postavili na ploču štednjaka, ovaj bi dobio, kod kvara na izolaciji kuhala, napon prema zemlji. Zaštitna sklopka neoštećenog štednjaka će isklopiti, a njegovo kućište ostat će i pored toga pod naponom preko defektnog kuhala. Zbog toga prenosiva trošila moraju također biti priključena preko zaštitne sklopke. Moramo upotrebljavati zaštitne utičnice s posebnim zaštitnim kontaktom, na koji se priključuje zaštitni vodič do kućišta trošila.

Neutralni vodič kod trofaznog četvorovodnog razvodnog sistema ne smijemo upotrebljavati za uzemljenje svitka za izbacivanje zaštitnog automata. U normalnom pogonu bilo bi doista sve

u redu i zaštitna sklopka bi pravilno djelovala kod kvara na izolaciji, kad bi na kućištu zaštićenog trošila nastao opasni napon. Ustvari, ne smijemo računati s time da će neutralni vodič uistinu imati uvijek potencijal zemlje po cijeloj svojoj dužini. Tu bi opet moglo doći do svih onih poteškoća, koje smo već upoznali kod nulovanja.

Kad bi neutralni vodič prigodom kvara na mreži dobio napon prema zemlji, zaštitna sklopka ne bi više mogla pouzdano isklopiti kod kvara na izolaciji zaštićenog trošila. Osim toga, kućište trošila dobilo bi preko svitka okidača zaštitne sklopke napon prema zemlji. Zbog svega toga neutralni vodič ne smijemo upotrebljavati umjesto pomoćnog uzemljenja zaštitne sklopke.

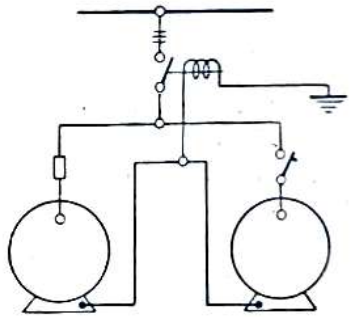
Međutim, takvu vezu bilo bi moguće načiniti preko kondenzatora, koji bi morao imati kapacitet nekih 0,5 μF. To rješenje bi potpuno odgovaralo, a s kondenzatorom bismo dobili osjetljivi element u zaštitnoj sklopki. Ako bi vremenom došlo do proboja izolatora, dobili bismo neposrednu metalnu vezu s neutralnim vodičem i nastupile bi sve prije opisane poteškoće. Takva zaštitna sklopka neizbježivo bi zahtijevala stalni strogi nadzor, na koji ne možemo pouzdano računati. Pomoću kondenzatora ili otpora također bismo mogli načiniti umjetnu nulu, na koju bismo priključili svitak okidača.

Zaštitni spoj možemo upotrebljavati i u mrežama s neposredno uzemljenim zvjezdištem i u mrežama s izoliranim zvjezdištem. U ovim posljednjim teći će, zbog nepotpune izolacije i kapaciteta vodiča prema zemlji, kroz svitak okidača u većini slučajeva dovoljno velika struja kvara, da zaštitna sklopka u slučaju kvara pouzdano isklopi. To uvijek moramo iskušati. U malim mrežama može se dogoditi da ne će teći dovoljno velika struja kvara za iskapčanje zaštitne sklopke, pa ni pokus s ispitnom tipkom ne će uspjeti. U svakom slučaju je karakteristika iskapčanja zaštitne sklopke tada viša i zato je najveći dopušteni prelazni otpor pomoćnog uzemljenja manji nego kod mreža s neposredno uzemljenim zvjezdištem. U većini slučajeva prelazni otpor pomoćnog uzemljenja morao bi biti od 50 do 100 Ω. U električnoj centrali ili u transformatorskoj stanici možemo za takav slučaj načiniti umjetnu nulu, koju povežemo sa zemljom preko otpora ili kondenzatora. Razumije se, da bi isto tako bilo moguće postaviti kondenzator paralelno s probojnim osiguračem između zvjezdišta i njegovog uzemljenja.

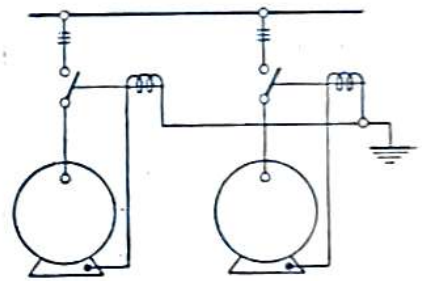
Ako u jednom strujnom krugu imamo više trošila, koja su pojedinačno osigurana, možemo postaviti, prema sl. 86., zajedničku zaštitnu sklopku za sva trošila. Moramo, međutim, imati na umu da će zaštitna sklopka isklopiti sva trošila kad dođe do kvara na izolaciji na jednom od njih. Premda je to rješenje jeftinije, zbog pogonske sigurnosti bolje je da svakom većem trošilu, prema sl. 87., damo vlastitu zaštitnu sklopku, koja može biti ujedno izrađena i kao automat za osiguranje.

Uzemljenje, razumije se, može biti zajedničko za sve zaštitne sklopke.

Vodič za uzemljenje od zaštitnog automata do pomoćnog uzemljenja može općenito biti gol, ali mora biti položen tako, da je osiguran od mehaničkog oštećenja, na primjer, treba biti položen u cijev. Bolje je da uzmemo i za njega izolirani vodič, čak i u slučaju kad je prelazni otpor pomoćnog uzemljenja razmjerno velik. Vodič za uzemljenje može, naime, preko drugih kvarova dobiti neki napon prema zemlji i zbog toga ne bi bilo dovoljno napona u krugu svitka okidača kod kvara na izolaciji zaštićenoga trošila. Takva zaštitna sklopka i pored kvara ne bi mogla isklopiti.



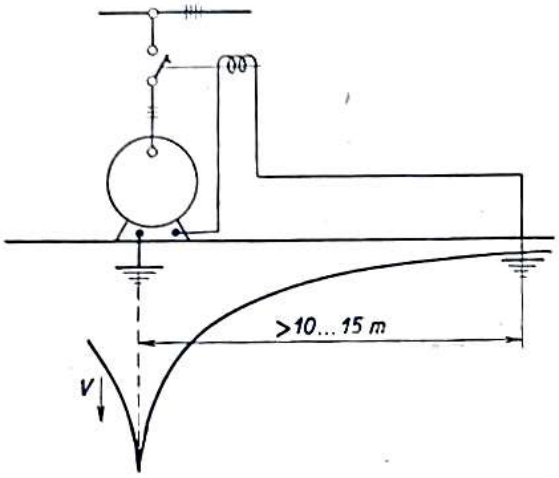
Slika 86. Zajednička zaštitna sklopka za više trošila



Slika 87. Zaštitni automati sa zajedničkim uzemljenjem

Sve to vrijedi u slučaju kad je trošilo razmjerno dobro izolirano prema zemlji. Vrlo često je trošilo već po svojoj prirodi dobro uzemljeno. Uzmimo, na primjer, motor za pogon centrifugalne crpke (pumpe). Kućište takvog motora je preko sklopke, odnosno zajedničke temeljne ploče, zatim crpke i cjevovoda, vjerojatno dobro uzemljeno. Ako bismo u tom slučaju koristili cjevovod ure-

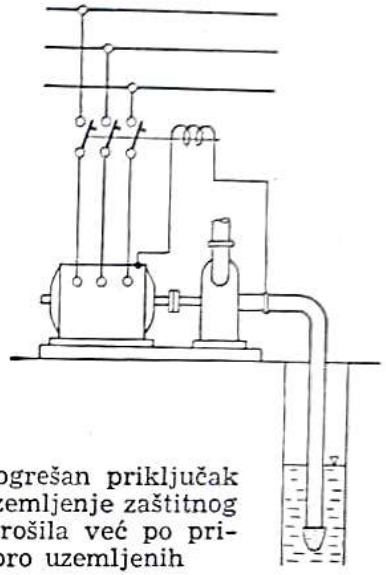
đaja crpke kao pomoćno uzemljenje zaštitne sklopke, eventualna struja kvara bi, razumije se, tekla neposredno od kućišta motora u cjevovod. Kroz svitak okidača, koji je tada kratko spojen, ne bi mogla teći dovoljno velika struja iskapčanja. U takvom slučaju



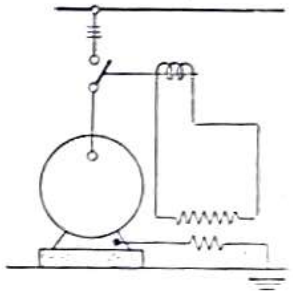
Slika 88. Pravilno uzemljenje svitka okidača zaštitne sklopke kod trošila, koja su prirodno uzemljena

možemo pomoći sebi tako, da na dovoljnoj udaljenosti (prema (sl. 88.), barem 10 do 15 m od uzemljenih cjevovoda ili neposrednih uzemljivača, postavimo pomoćno uzemljenje, do kojega položimo vodič za uzemljenje svitka okidača. Tada mora teći dio struje kvara kroz svitak okidača, iako je i drugi usporedni put struji na raspolaganju. U svim slučajevima gdje trošilo nije potpuno izolirano, potrebno je povući ne samo zaštitni vodič od trošila do svitka okidača, nego i vodič za uzemljenje dobro izoliran do dovoljno udaljenog pomoćnog uzemljenja. Oko neposrednog uzemljenja trošila prigodom kvara na izolaciji trošila nastaje u zemlji naponski lijevak. Pomoćni uzemljivač zaštitne sklopke ni u kojem slučaju ne smije biti unutar naponskog lijevka. Bilo bi potpuno pogrešno kad bismo vodič za uzemljenje priključili neposredno na cjevovod uređaja crpki, na primjer prema sl. 89. Isto tako moramo biti oprezni u slučaju kad je trošilo u metalnoj vezi s razgranatim provodnim cjevovodima u zemlji. Pomoćni uzemljivač mora biti dovoljno udaljen od takvih cjevovoda.

Zaštitni spoj može se načiniti i prema drugim principima. Tako možemo načiniti i spoj prema sl. 90., gdje je svitak okidača priključen na sekundarnu stranu strujnog transformatora, koji je primarno uključen u vodič za uzemljenje od kućišta trošila do uzemljivača. Čim omotač trošila dobije napon prema zemlji, teći će struja kvara kroz vodič za uzemljenje u zemlju. Tada će teći struja i kroz svitak okidača. Kod dovoljno velikog napona kvara ta struja može isklopiti automat. Uslov je, da je trošilo postavljeno izolirano, jer inače struja kvara ne teče u cjelini kroz primarni namotaj strujnog transformatora u zemlju. Takve izvedbe zaštitnog spoja nisu se mogle ustaliti u praksi.



Slika 89. Pogrešan priključak vodiča za uzemljenje zaštitnog spoja kod trošila već po prirodi dobro uzemljenih



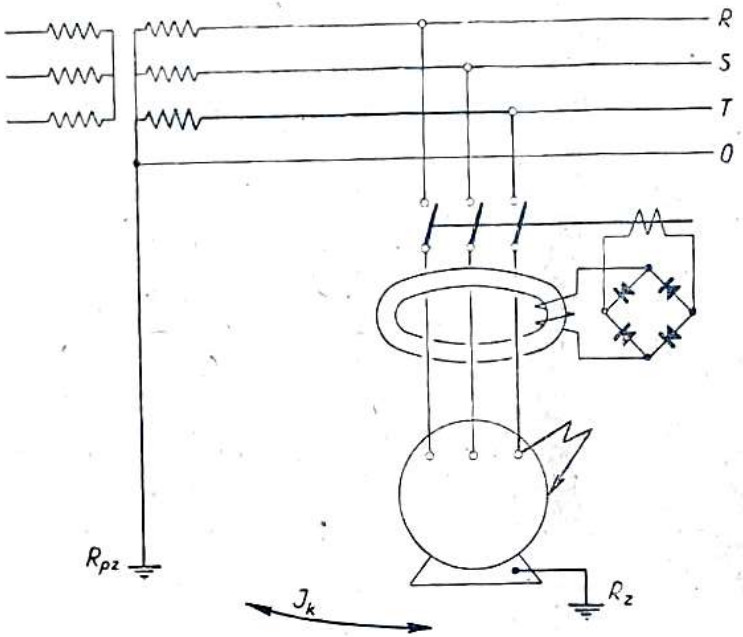
Slika 90. Zaštitni spoj sa strujnim transformatorom u vodiču za uzemljenje

9. STRUJNI ZAŠTITNI SPOJ

U novije vrijeme ponegdje se mnogo upotrebljava strujni zaštitni spoj, koji ima, u poređenju s naponskim zaštitnim spojem, određene prednosti. U biti je osjetljivije zaštitno uzemljenje, odnosno osjetljivije nulovanje.

Upotrebljavamo strujni zaštitni automat prema sl. 91., koji iskapča pod djelovanjem struje kvara. Djeluje ovako. Pri normalnom pogonu teče kroz tri vodiča dovoda k trošilu struja jednake jačine, a zbir struje u svakom je trenutku jednak nuli. Sve te tri struje nastoje magnetizirati željeznu jezgru koja ih okružuje, međutim je zajedničko uzbuđenje jednako nuli, pa zato nema ni

magnetnog fluksa, a u sekundarnom svitku toga transformatora ne inducira se napon. Čim nastane spoj između namotaja jedne faze i kućišta, na slici naznačenog strelicom, teći će pod djelovanjem faznog napona struja kvara u zemlju. Ta struja teče i kroz zaštitni vodič, kojega ne okružuje željezno jezgro transformatora na zajednički fluks. Zbir svih trenutnih jačina struje kroz tri vodiča dovoda nije više jednak nuli. Zbog toga se ustvari željezo namagnetizira prema jačini struje kvara. U sekundarnom namotaju inducira se napon, koji potjera struju kroz svitak okidača zaštitne sklopke, što prouzrokuje iskapčanje sklopke.



Slika 91. Zaštitni spoj na struju kvara, s uzemljenim kućištem trošila

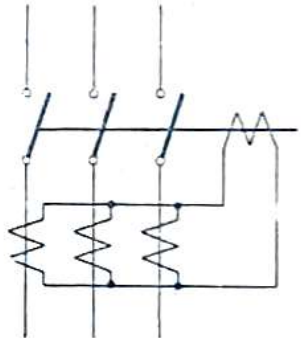
Tako se trošilo isklapa od mreže čim nastane kvar na izolaciji, pa struja teče od namotaja preko zaštitnog vodiča i neutralnog vodiča do zvjezdišta transformatora. Vidimo, da se neutralni vodič tu zapravo ne upotrebljava kao neutralni vodič u prijašnjem smislu, nego kao zaštitni vodič. Na njega ne smijemo priključivati jednofazna trošila. Ako bismo htjeli priključiti jednofazna trošila, morali bismo imati, osim prije navedenog zaštitnog vodiča, još poseban neutralni vodič, kod čega bi oba vodiča bila priključena na zvjezdište transformatora.

Svitak za izbacivanje na struju kvara većinom nije neposredno priključen na strujni transformator na uravnoteženi fluks, nego preko usmjerivača, kako je to naznačeno na slici.

Takav zaštitni automat na struju kvara obično je udružen s motornim zaštitnim automatom, koji ima, osim tri termička i eventualno magnetska okidača, još i dodatni strujni okidač kvara s pripadajućim strujnim transformatorom. Jezgro toga strujnog transformatora mora obuhvatati sva tri fazna dovoda, a ne smije obuhvatati zaštitni vodič od kućišta do zaštitnog uzemljivača. Sada će zaštitni automati isklopiti trošilo od mreže obično kod struje kvara od nekoliko ampera, na primjer 3 ili 5 A, odnosno kod struje kvara od nekih 10% nazivne struje trošila veće snage. Vrlo osjetljivi zaštitni automati isklapaju trošilo već pri struji kvara od 1 A, ili još manjoj. Magnetsko jezgro mora biti od materijala velike magnetske provodljivosti, većinom od mumetala.

Zaštitni automat na struju kvara mora imati svako pojedino trošilo, odnosno vod naše mreže. Potrebnu selektivnost iskapčanja postižemo stepenovanjem jačine struje iskapčanja kvara u smjeru prema transformatorskoj stanici, odnosno odgovarajućim vremenskim stepenovanjem iskapčanja.

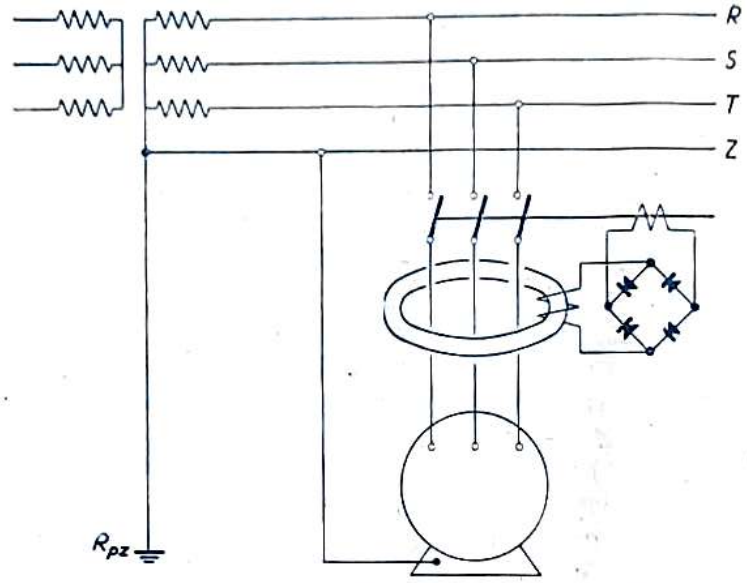
Umjesto diferencijalnog transformatora sa samom jednom jezgrom, možemo upotrebiti tri jednofazna strujna transformatora u diferencijalnom spoju, kod kojih su stezaljke povezane i napajaju se prema sl. 92., zajednički svitak za izbacivanje, u većini slučajeva opet preko usmjerivača.



Slika 92. Shema spoja tri jednofazna strujna transformatora u diferencijalnom spoju, koji napajaju zajednički svitak za izbacivanje

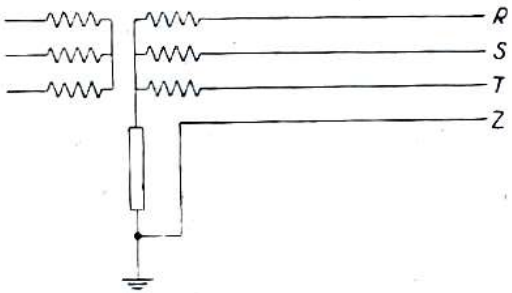
U spoju prema prijašnjoj slici 91., kućište trošila je uzemljeno i strujni zaštitni automat u tom slučaju djeluje kao osjetljivije zaštitno uzemljenje. Prema sl. 93. možemo kućište trošila povezati također i s neutralnim vodičem i tada imamo u suštini osjetljivije nulovanje. Međutim, u tom slučaju moramo zahtijevati da neutralni vodič ima po cijeloj svojoj dužini barem približno potencijal

zemlje. Moraju, dakle, biti ispunjeni isti uslovi kao i kod nulovanja. U takvim mrežama neutralni je vodič ustvari u cjelini zaštitni vodič. Iz te spoznaje proizlazi, da na njega ne smijemo priključiti jednofazna trošila. Zbog toga ta zaštita na struju kvara dolazi u



Slika 93. Spoj neutralnog vodiča sa kućištem elektro motora

obzir, prije svega, samo u industrijskim kabelskim mrežama. Ako moramo priključivati jednofazna trošila, moramo za njih predvidjeti poseban neutralni vodič, osim zaštitnog vodiča. Oba moraju biti povezana sa zvjezdištem transformatora.



Slika 94. Shema spoja otpora između zaštitnog vodiča i zvijezdišta transformatora

Budući da struja kvara teče po zatvorenom strujnom krugu, ima razmjerno veliku jačinu. Zato uključujemo ponekad između zaštitnog vodiča mreže i zvjezdišta transformatora, prema sl. 94.,

otpor, koji treba da ograniči jačinu struje. Jačina struje kvara mora pak biti tolika, da sigurno dođe do iskapčanja trošila u slučaju kvara na izolaciji, odnosno, automati na struju kvara moraju biti dovoljno osjetljivi. Otpor takvog otpora, koji se ugrađuje između zvjezdišta i zemlje, iznaša nekih 10 Ω.

Nasuprot zaštitnom automatu na napon kvara, prednost automata na struju kvara je ta, da mora sigurno isklopiti kod velike struje kvara, u svakom slučaju, te da nemamo onih poteškoća, potanko opisanih u prijašnjem poglavlju, koje zahtijevaju izolirani zaštitni vodič do naponskog svitka okidača, odnosno čak sve do uzemljivača, jer automat na napon kvara može nehotično isklopiti, odnosno uopće ne isklopiti.

10. KRITIČKI PREGLED ZAŠTITNIH MJERA

Potanko smo izložili pojedine zaštitne mjere i upoznali njihove prednosti, nedostatke i poteškoće njihove primjene. Za njihovu pravilnu ocjenu potrebno je da ih ponovo ukratko razmotrimo.

Potrošač zahtijeva, da zaštita prigodom kvarova na izolaciji bude tako djelotvorna, da se trošilo, koje dobije kvar na izolaciji, isključi netom njegov omotač dobije prekomjerno visok i opasan napon prema zemlji, odnosno, da opasni dodirni napon uopće ne može nastati. Ovo posljednje možemo postići zapravo samo kod *malih napona,* koji su upotrebljivi u izuzetnim slučajevima, za mala trošila. Napon moramo transformirati u neposrednoj blizini takvih trošila, jer je područje, koje možemo opskrbljivati malim naponom, vrlo maleno. *Izoliranje* je također primjenljivo vrlo rijetko, uglavnom kod malenih prenosnih trošila. Pravilno izvedeno *zaštitno uzemljenje* vrlo je pouzdana i cijenjena zaštitna mjera. Prelazni otpor zaštitnog uzemljenja, međutim, mora biti dovoljno malen, jer samo tada osigurač trošila pouzdano iskapča kad kućište trošila dobije nedozvoljeno velik napon kvara. Zaštitno uzemljenje primjenljivo je samo za manja trošila, jer bi prelazni otpor kod trošila veće snage morao biti tako malen, da bi bio preskup, odnosno tehnički neizvediv. Međutim, tome možemo doskočiti na taj način, da kućišta svih uzemljenih trošila međusobno povežemo. Ta mjera vrlo je djelotvorna kod razvodnog sistema s izoliranim zvjezdištem, ako je izvedeno dosljedno, te na uzemljeni *zaštitni vodič* priključimo sve dohvatljive metalne dijelove. Tada struja kvara kroz uzemljenje praktički ne teče, jer ima lakši put na raspola-

ganju kroz zaštitni vodič. U razvodnim mrežama s izoliranim zvjezdištem i s kontrolom izolacije, zaštita zaštitnim vodičem daje najveću sigurnost. Uzemljenje zaštitnog vodiča ima tada još i tu ulogu, da zaštitnom vodiču, odnosno priključenim zaštitnim kućištima, osigura potencijal zemlje.

Nulovanje je za potrošača najjeftinija zaštitna mjera. Nedostatak nulovanja je u tome, što se moramo pobrinuti da neutralni vodič i u slučaju kvarova na mreži dobije uvijek samo primjereno maleni napon prema zemlji na svoj svojoj dužini. Zbog tog zahtjeva moramo neutralnom vodiču dati presjek kakav imaju fazni vodiči, a osim toga moramo ga uzemljiti na početku i na kraju voda, odnosno na više mjesta. Nulovanje nalaže električnoj centrali obaveze u mnogo većem opsegu nego ostale zaštitne mjere. Prelazni otpor takvih pogonskih uzemljenja mora biti razmjerno malen, najviše 1,5 Ω kod napona 380/220 V. Zbog navedenih razloga nulovanje upotrebljavamo prije svega u kabelskim mrežama, to jest u gradskim i tvorničkim mrežama.

Zaštitni spoj je najskuplja zaštitna mjera, jer zahtijeva posebnu automatsku zaštitnu sklopku. Jeftinije je ako automatsku zaštitnu sklopku združimo s automatskom motornom zaštitnom sklopkom, koja iskapča sklopku pomoću kratkospojnih i termičkih okidača kod prejake struje, jer sama dobije dodatni okidač, na kojega djeluje struja kvara. Zaštitni spoj vrlo je djelotvoran i upotrebljiv u svakom slučaju, a prije svega u slučaju kad zaštitno uzemljenje kod većih trošila nije izvodljivo. Nedostatak naponskog zaštitnog spoja je u tome, što zahtijeva izvježbane i pouzdane montere, koji paze na to, da je pomoćni uzemljivač svitka okidača izvan mogućeg naponskog lijevka uzemljenih trošila i da su zaštitni vodič i vodič za uzemljenje pravilno položeni. Moramo paziti na sve ono, što smo naveli u vezi sa zaštitnim spojem. Zaštitni spoj zahtijeva također i povremenu kontrolu pravilnog djelovanja. Potrebno je, naime, češće ispitati iskapčanje pomoću pokusnog tipkala. Zbog toga nadzor u pogonu mora biti pouzdan, ako je u njemu upotrebljen zaštitni spoj kao zaštitna mjera. Te nedostatke naponskog zaštitnog spoja možemo otkloniti pomoću strujnog zaštitnog spoja. Strujni zaštitni automat je, zbog ugrađenog diferencijalnog transformatora, nešto skuplji od naponskog zaštitnog automata.

Kad osigurač uzemljenog ili nulovanog trošila pregori ili kad isklopi zaštitni automat, upozori nas time da je nastao kvar na izolaciji. Kvar moramo što prije otkloniti.

To upozorenje ne smijemo ni u kom slučaju zanemariti. U takvim slučajevima ne smijemo namještati jače osigurače, koji ne bi pregorjeli. Struja kvara bi, naime, tada trajno tekla i kućište trošila imalo bi stalni napon prema zemlji. Osim toga bi mali kvar ubrzo prouzrokovao veći. Motor bi pregorio, a izdaci za popravak bili bi neuporedivo veći.

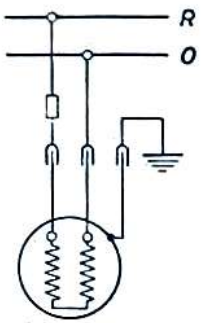
Zaštitne mjere moramo uvijek provoditi i kod samih instalacija. Pravilno izvedena i dobro održavana instalacija također uveliko smanjuje opasnost od električne struje. Oštećene ili odstranjene izolacije ne smiju ostati u mreži koja je pod naponom, a ni prekidači s razbijenim poklopcem ili bez njega. Isto tako ne smijemo trpjeti da u pogonu ostanu zastarjeli uređaji, kod kojih je opasnost znatno veća. Moramo se, nadalje, pridržavati pravila, da se neutralni vodič u instalacijama mora svagdje razlikovati od faznih vodiča, bilo bojom, bilo na taj način, što ćemo za nulti vodič uzeti slabije izoliranu žicu. Zaštitni vodiči općenito mogu biti goli. Samo kod zaštitnog spoja mora zaštitni vodič, a ponegdje i vodič do uzemljivača, biti izoliran.

Presjek zaštitnih vodiča, to jest vodiča za uzemljenje, nulovanja i za zaštitni spoj, mora biti barem 1,5 mm², ako ih polažemo zaštićeno, na primjer u cijevima ili kao pridodanu žicu. Inače treba da imaju barem 4 mm², ako upotrebljavamo bakrene vodiče. Treba da imaju polovični presjek faznih vodiča; u svakom slučaju dovoljan je presjek 50 mm². Kablovi i vodovi za vlažne prostorije imaju pridodanu žicu, položenu neizolirano odmah ispod cijevnog plašta voda. Tako pridodana žica već je dovoljno dimenzionirana kao zaštitni vodič. Kod zaštitnog spoja ne smijemo pridodane žice upotrebljavati za zaštitni vodič od omotača zaštićenoga trošila do svitka okidača zaštitnog automata, jer zaštitni vodič mora biti, kao što smo vidjeli, izoliran. U tom slučaju upotrebljavamo četverožilni vod, a kao zaštitni vodič četvrtu izoliranu žicu. U svim primjerima je još bolje ako zaštitni vodič vodimo kao četvrti, odnosno dodatni izolirani vodič gibljivih vodova i kablova, a ne odvojeno, na primjer usporedo s vodom ili kablom.

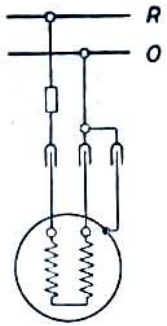
Moramo biti posebno pažljivi kod upotrebe prenosnih trošila, priključenih na priključnicu. Zaštitni vodič mora biti izveden od trošila preko priključnice, kako je prikazano na sl. 95. za zaštitno uzemljenje i na sl. 96. za nulovanje, na primjer jednofaznih trošila. Kod nulovanja nikada ne smijemo načiniti vezu samo u trošilu između nule i omotača prema sl. 97., jer bi kućište dobilo puni fazni napon, ako zamijenimo polaritet utikača.

Utikači i priključnice moraju imati, dakle, dodatni zaštitni pol za zaštitni vodič i moraju biti tako načinjeni, da se najprije povežu zaštitni vodiči. Zaštitna veza postiže se ili nesimetričnim razmještajem polova na utikačima s tri utikača, ili simetrično sa zaštitnim kontaktima izvedenim sa strane.

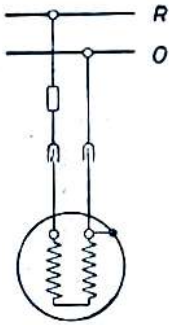
Električna centrala mora se brinuti za dobra pogonska uzemljenja. Dužna je odrediti kakve zaštitne mjere smiju biti upotrebljene u njenoj mreži, mora se brinuti o tome, da se potrebne zaštitne mjere izvode i mora ih prema potrebi kontrolirati. Električna centrala mora također odrediti, da li se vodovodna mreža smije upotrebljavati za pogonska uzemljenja, ako su za to ostvareni potrebni uvjeti.



Slika 95. Pravilno na priključnicu priključeno uzemljeno trošilo



Slika 96. Pravilno priključeno trošilo nulovano u priključnici



Slika 97. Nepravilan priključak nulovanog trošila na priključnicu

Zaštitne mjere, prema tome, imaju vrlo veliko značenje. Praktičari ih ponekad suviše zanemaruju. Pravilna zaštita smanjuje opasnost od električnih nesreća i može nam sačuvati mnogo dragocjenih života. Usprkos zaštitnim mjerama, uvijek moramo biti svijesni postojeće opasnosti, koja nam prijeti od električnih uređaja. To vrijedi u jednakoj mjeri i za stručnjake i za nestručnjake. Potrebno bi bilo da se svi na odgovarajući način pouče o toj opasnosti. Za sve vrijedi staro pravilo: što smo oprezniji, opasnost je manja!

Tabela I. Potrebne zaštitne mjere prema visini napona

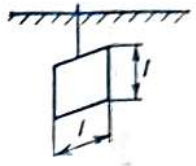
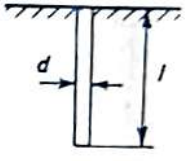
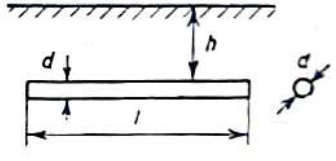
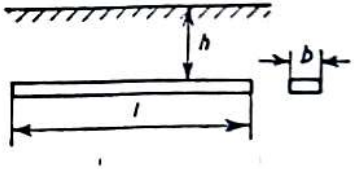
Zaštitne mjere su	nepotrebne	potrebne
kod napona do 50 V prema zemlji	uvijek	nikada
kod napona od 51 do 150 V prema zemlji	1) U suhim prostorijama s podom od izolacionog materijala drva, linoleuma i t. d. 2) U suhim prostorijama s podom od kamena, betona i t. d., mogućnost samo slučajnog dodira	1) U suhim prostorijama s vodljivim podom 2) U suhim prostorijama s podom od kamena, betona itd., ako dolazi u obzir obuhvatanje 3) U vlažnim prostorijama 4) Kad moramo istovremeno uhvatiti električne uređaje, na primjer kućišta i dobro uzemljene predmete, na pr. vodovod ili centralno grijanje
kod napona od 151 do 250 V prema zemlji	U suhim prostorijama s podom od izolacionog materijala drva, linoleuma i t. d.	U svima prostorijama, osim sa suhim podom od izolacionog materijala drva i linoleuma
kod napona iznad 251 V prema zemlji	nikada	uvijek

Tabela II. Specifični otpor tla

Vrsta tla	Specifični otpor Ω m
Močvarno tlo	20 ... 50
Ilovača	30 ... 150
Humus	50 ... 200
Pijesak	200 ... 1000
Šljunak	500 ... 2000
Kamenito tlo	2000 ... 5000
Bazalt	~ 10.000
Gnajs	~ 1,000.000
Provodne rudače	~ 100
Destilirana voda	~ 10.000
Morska voda	~ 0,3

N a p o m e n a : Specifični otpor se jako mijenja s vlažnošću tla.

Tabela III. Prelazni otpor uzemljivača
(ϱ Ω m je vlastiti otpor tla, dimenzije u m)

Vrsta uzemljivača	Prelazi otpor (Ω)	
	točno	približno
ploča kvadratična 	$\frac{\varrho}{4\,l}$	$\frac{\varrho}{4\,l}$
cijev 	$\frac{\varrho}{2\pi l}\ ln\ \frac{4\,l}{d}$	$\frac{\varrho}{l}$
uže, žica 	$\frac{\varrho}{2\pi l}\ ln\ \frac{l^2}{d\,h}$	$2{,}1\ \frac{\varrho}{l}$
traka 	$\frac{\varrho}{2\pi l}\ ln\ \frac{2\,l^2}{h\,b}$	$2{,}3\ \frac{\varrho}{l}$

REGISTAR POJMOVA

Automat 48
— mrežni 108
— stanični zaštitni 66

Cijevni uzemljivač 79

Dodir, faznog vodiča 17
— slučajni 32
dubinski uzemljivač 76
dvostruki zemljospoj 44, 55

Grupni uzemljivač 77

Induktivni otpor 90
izolacioni otpor 21
izolirajući transformator 24
izoliranje 35

Jednofazno preopterećenje 106

Karakteristika iskapčanja 110
kontrola izolacije 27
kratki spoj 89
kupaonica 32

Lijevak, naponski 74

Mali napon 34
Megger 82
mjerenje, napona kod dodira 19
— prelaznog otpora uzemljivača 81

Napon, dodirni 12
— iskapčanja 111
— kontakta 76
— kvara 15
— mali 34
— opasni 13
— visoki 67
naponski, lijevak 74
— osigurač 29
nesreće 8
neutralni vodič prekinut 96
nulovanje 85

Obuhvatanje 32
opasna struja 10
opasni napon 13
opterećenje, jednofazno 106
osigurač, 29, 84
— naponski 29
— probojni 29
— tromi 47
otpor, čovječeg tijela 13
— induktivni 90
— izolacioni 21
— prelazni 16

Petersonova prigušnica 69
ploča za uzemljenje 80
pogonsko uzemljenje 62
prigušni transformator 72
prekinut neutralni vodič 96
prelazni otpor 16
presjek vodiča za uzemljivanje 69
probojni osigurač 29

Slučajni dodir 32
sonda 81
spoj, faznog i neutralnog vodiča 107
— između visokog i niskog napona 63
srce 11
stanični, zaštitni automat 66
stepen iskoristivosti grupnog uzemljivača 77

struja, opasna 9, 14
svitak za izbacivanje 109

Transformator, izolirajući 24
— prigušni 72
— zaštitni 34
tromi osigurač 47

Uzemljenje, kod nulovanja 87
— kraja vodiča 95
— zaštitno 37, 87
uzemljivač 73
— cijevni 80
— dubinski 76
uzemljivač, grupni 77
— pločasti 79

Visoki napon 67
vodič za uzemljavanje 69, 116
vodovod 80

Wiechert 81

Zaštitni spoj 109
— spoj sa stupnim transformatorom 117
— stanični automat 66
— transformator 34
— vodič 57, 112
zaštitno uzemljenje 37, 87
zemljospoj 24, 62, 69, 86
— dvostruki 44, 45

Živčani sistem 11

SADRŽAJ

Strana

Predgovor 5
Predgovor slovenskom izdanju 6
1. Nesreće od električne struje 7
2. Dodirni napon 12
a) Električne mreže s uzemljenim zvjezdištem 14
b) Mreže s izoliranim zvjezdištem 20
3. Stepen opasnosti i pregled zaštitnih mjera 31
4. Mali napon 34
5. Izoliranje 35
6. Zaštitno uzemljenje 37
a) Zaštitno uzemljenje u mrežama s uzemljenim zvjezdištem 38
b) Zaštitno uzemljenje u mrežama s izoliranim zvjezdištem 51
c) Dimenzioniranje pogonskog uzemljenja kod uređaja niskog napona 67
d) Izvedba uzemljivača 73
e) Kontrola uzemljivača 81
7. Nulovanje 85
8. Naponski zaštitni spoj 108
9. Strujni zaštitni spoj 117
10. Kritički pregled zaštitnih mjera 121
11. Tabele 125

Znak 224 M

Izdanje:
Prof. Dr. Ing. DRAGO MATANOVIĆ

ZAŠTITNE MJERE U ELEKTRIČNIM UREĐAJIMA

Preveo sa slovenskog:
Ing. RATIMIR ŽURIĆ

Izdavač:
TEHNIČKA KNJIGA — izdavačko poduzeće
Zagreb, Jurišićeva 10

Za izdavača:
Ing. KUZMAN RAŽNJEVIĆ

Uredništvo za tehničke monografije —
glavni urednik:
ZVONIMIR VISTRIČKA

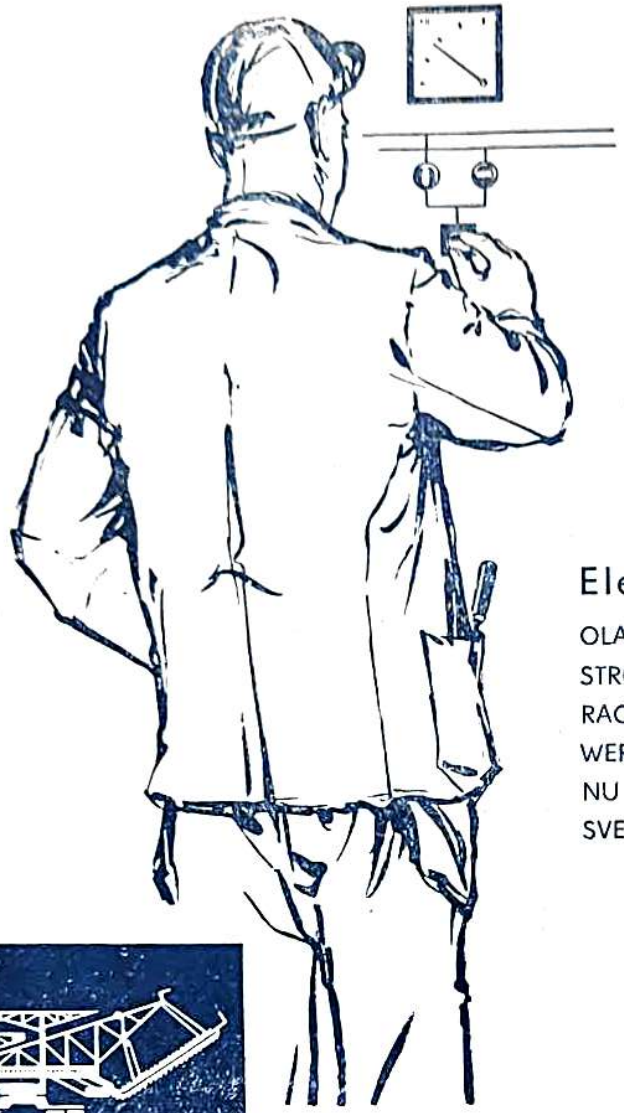
Urednik edicije:
IVAN UREMOVIĆ

Korigirao: AUTOR

Tisak:
Tiskara VJESNIK pogon TIPOGRAFIJA, Zagreb

Tisak dovršen:
PROSINAC 1959

SIEMENS



Električna energija

OLAKŠAVA RAD RUDARA OD STROJA NA USKOPU DO SEPARACIJE. SIEMENS SCHUCKERTWERKE DOBAVLJAJU CJELOKUPNU ELEKTRIČNU OPREMU ZA SVE RUDARSKE POGONE.

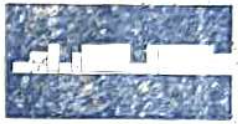
SIEMENS - SCHUCKERTWERKE AKTIENGESELLSCHAFT
BERLIN . ERLANGEN
GENERALNO ZASTUPNIŠTVO ZA JUGOSLAVIJU:
GENERALEXPORT BEOGRAD
ZAGREB · LJUBLJANA · RIJEKA · SARAJEVO

AEG

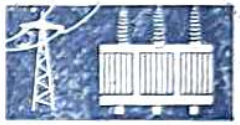
ELEKTRIČNA POSTROJENJA I APARATI SVIH VRSTA

Savjetovanje — Projektovanje — Izgradnja

Proizvodnja
električne energije



Raspodjela električne energije
Pretvarači struje



Električna oprema
za željeznice,
brodove, aerodrome

Električna oprema
za industrijska postrojenja

Elektronika
Mjerenja
Regulacija — Ispitivanje

Aparati za domaćinstvo

Generalno zastupstvo za Jugoslaviju:

INTEREXPORT

Preduzeće za medjunarodnu trgovinu

BEOGRAD, Kolarčeva ul. br. 8-10
Telefon 27-751-4; Telex 01-173

ZAGREB, Pod Zidom 3
Telefon 24-465, 24-485; Telex 02-147

LJUBLJANA, Titova cesta 25
Telefon 32-059-63

SARAJEVO, Fra Grge Martića 2
Telefon 41-83

SKOPJE, Ul. Naroden Front 9
Telefon 10-31

RIJEKA, Lenjinovo šetalište br. 10
Telefon 37-77

SPLIT, Trg Žrtava Fašizma 20
Telefon 37-72

7216

ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT
Berlin (West) Frankfurt (Main)